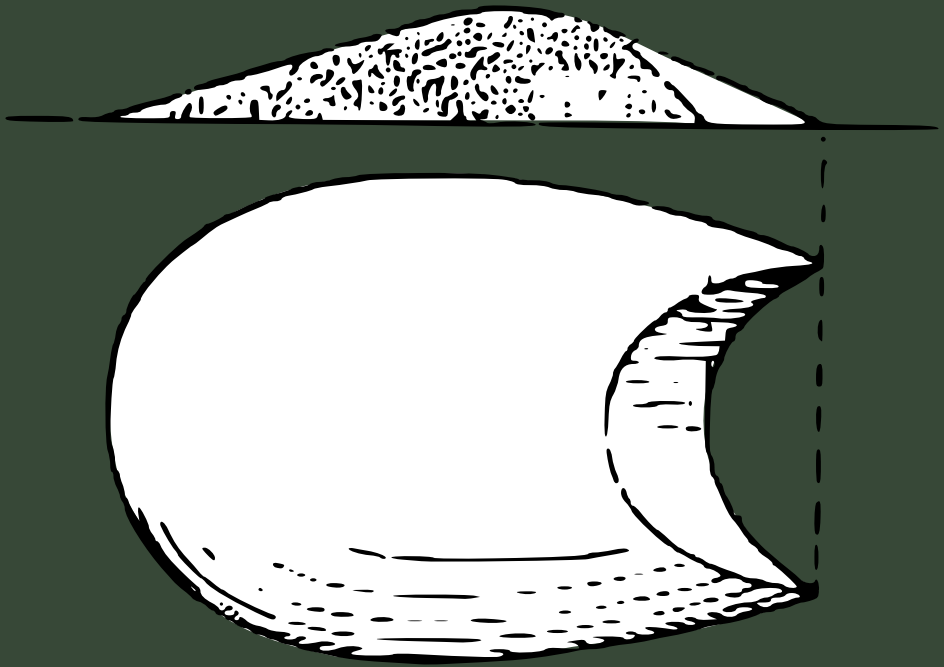
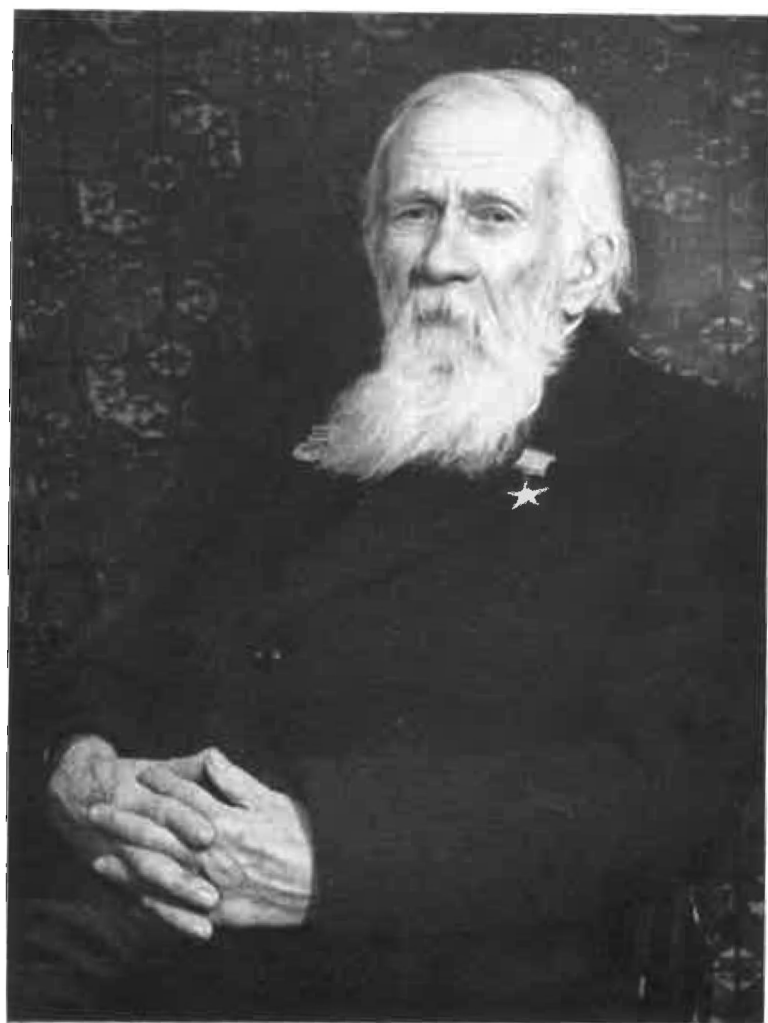


V. Obroutchev

ELEMENTS DE GEOLOGIE



EDITIONS EN LANGUES ETRANGERES



V. OBROUTCHEV
DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES
DE L'U.R.S.S.

É LEMENTS DE GEOLOGIE

OUVRAGE DE VULGARISATION SCIENTIFIQUE

EDITIONS EN LANGUES ETRANGERES
Moscou 1959

TRADUIT DU RUSSE PAR MICHEL RYGALOV

Академик В. А. ОБРУЧЕВ

ОСНОВЫ ГЕОЛОГИИ

AVANT-PROPOS

Vous avez probablement lu au moins un de ces ouvrages : *Physique, Chimie, Arithmétique, Algèbre, Géométrie, Mécanique*, de la série dite récréative. On y décrit, sous forme de courts récits, des processus et phénomènes de la nature intéressants pour l'homme, des mécanismes originaux ; diverses énigmes mathématiques, physiques, chimiques et mécaniques y sont dévoilées, des "casse-tête" y sont proposés, et le lecteur peut ainsi, d'une façon attrayante et facile, s'initier aux éléments de certaines sciences. Une *Minéralogie divertissante* a même vu le jour et a déjà fait l'objet de plusieurs éditions ; A. Fersman, de l'Académie des Sciences, a prouvé que la minéralogie, qui paraît assez sèche avec ses énumérations de minéraux, de leurs formes, de leurs propriétés et des lieux où on les rencontre, peut être rendue très attrayante ; il a su insuffler la vie aux pierres mortes, montrer leur utilisation et leurs applications diverses dans la vie et la technique, intéresser le lecteur aux montagnes et aux carrières, aux gisements et aux mines, et l'entraîner dans le monde des minéraux et des cristaux.

D'autant plus la géologie doit-elle présenter d'attrait, car elle étudie la Terre où nous vivons ; cette science est consacrée à l'histoire de la formation de la Terre, à sa composition et aux changements qu'elle avait subis au cours des millions d'années de son existence. La géologie nous apprend à pénétrer dans la profondeur des temps, nous aidant à expliquer les modifications de l'écorce terrestre à l'aide des phénomènes qui se déroulent constamment sous nos yeux et sont accessibles à nos investigations. La chaleur que fournit le Soleil, les mouvements de l'air qui forment les vents, les gouttes de pluie, la rosée, le gel, les cristaux de neige et même les plantes et les animaux sont autant d'agents géologiques dont cette science nous apprend à connaître l'activité. La face du

Monde, c'est-à-dire les formes de la surface de la Terre que nous voyons autour de nous et dont nous nous émerveillons souvent, a été façonnée grâce à l'action de ces différents agents, ainsi que par d'autres facteurs, souvent dissimulés, et qui se manifestent de temps à autre sous la forme de phénomènes aussi impressionnants que l'éruption des volcans, ou aussi destructifs que les tremblements de terre.

Les personnes qui ne possèdent pas ne serait-ce que quelques rudiments de géologie sont en quelque sorte semblables à des aveugles. Sur le bord d'un ravin, elles voient en un endroit une roche dure, ailleurs une couche de terre meuble, mais elles ne comprennent pas la nature de ces roches, ne savent pas comment le ravin s'est formé. Elles remarqueront dans une vallée montagneuse des pierres de couleurs différentes, s'étonneront de voir les couches de ces pierres tantôt étrangement enchevêtrées, tantôt verticales, comme des planches, admireront un rocher pittoresque, une gorge sombre, une cascade, mais à part quelques impressions superficielles, ces diverses images ne leur révéleront rien. Et ainsi, partout, elles ne perçoivent que l'extérieur des choses, sans en comprendre le fond. La géologie nous apprend à regarder les yeux grands ouverts la nature qui nous entoure et à comprendre l'histoire de son évolution.

Elle nous aide également à découvrir différents minerais, la houille, le pétrole, le sel et autres minéraux indispensables à l'homme. Sans la géologie nous ne pourrions chercher les gisements de ces minéraux suivant un plan établi à l'avance, et serions réduits à errer à travers le pays en espérant qu'un heureux hasard nous permettra de tomber sur l'un d'eux. Sans la géologie, il nous serait impossible de juger de la qualité et de la quantité du minerai découvert et d'en organiser l'extraction. La géologie a donc une grande importance, non seulement pour notre culture générale, mais aussi par sa valeur pratique.

Mais elle ne se borne pas à la découverte et à l'étude des minéraux utiles; son champ d'action est beaucoup plus vaste. La construction des grands édifices, des routes et voies ferrées, des aérodromes, le percement des tunnels, l'édification de grands barrages permettant d'utiliser la force de l'eau, — tous ces travaux exigent une étude préalable minutieuse du sol, de sa composition et de sa structure. En négligeant les données géologiques il est impossible de bâtir de façon rationnelle, avec une dépense minimum de ressources, de main-d'œuvre et de temps.

La géologie étudie également les eaux souterraines et les conditions qui permettent de les utiliser pour l'approvisionnement en eau des villes et des entreprises industrielles, ainsi que les moyens de les détourner, si leur action est nuisible; elle s'intéresse aussi aux sources minérales et aux conditions de leur apparition à la surface.

Je pense que ce qui vient d'être dit suffit pour justifier cette conclusion, que la connaissance des éléments de la géologie est indispensable à toute personne cultivée. Le présent ouvrage se propose d'en faciliter l'acquisition. C'est pourquoi il ne peut être un recueil de récits consacrés à des phénomènes curieux ou énigmatiques, à des comparaisons instructives prises au hasard dans le vaste arsenal de la science. Un exposé systématique est ici indispensable. Il permettra au lecteur de connaître l'activité des forces de la nature qu'il peut observer dans la proximité immédiate des villes, dans la campagne, sur les monts et dans les vallées: le travail de l'eau stagnante, courante et souterraine, l'action du vent et de la glace et son résultat tant dans la formation des diverses espèces de minéraux qui constituent la surface terrestre que dans la destruction et la transformation de ses aspects.

Une fois que le lecteur aura fait connaissance avec ces forces que l'on appelle externes, nous lui montrerons comment agissent les forces cachées dans les entrailles de la Terre, et qui se manifestent par la formation des chaînes montagneuses, l'éruption des volcans et les tremblements de terre. Ceci fait, nous pourrons passer à un bref exposé de l'histoire de la Terre, de l'apparition et du développement de la vie et à l'explication des cataclysmes qui sont des épisodes de cette histoire; puis nous pourrons décrire la formation des minéraux utiles et jeter un peu de lumière sur les lois qui régissent leur répartition sur le globe, en particulier sur le territoire de l'U.R.S.S. Le dernier chapitre sera consacré à la signification et à l'importance des documents géologiques et aux méthodes d'investigation, ainsi qu'à l'étude des vestiges laissés par l'histoire de la Terre.

Enfin, nous tenons à signaler que notre ouvrage ne peut prétendre, par son volume, embrasser la géologie tout entière. Il se limite à cette branche de la science que l'on nomme géologie physique ou géodynamique et qui traite de l'activité des forces externes et internes formant et modifiant l'écorce terrestre. Ce n'est que dans ses grandes lignes que nous exposerons l'évolution de la Terre, dont s'occupe une branche spéciale de la géologie

— la géologie historique ou stratigraphie; il en sera de même pour celle qui étudie les produits de l'activité des forces internes et externes de la nature — les minéraux utiles.

Nous n'aborderons que très succinctement, dans les limites de l'indispensable, les problèmes de la formation des diverses espèces de roches qui constituent l'écorce terrestre, et dont s'occupe plus spécialement une quatrième branche de la géologie — la pétrographie ou lithologie — la science des pierres. La connaissance de la géologie physique est indispensable pour procéder à l'étude de ces branches plus spéciales de la géologie; elle est, en fait, une introduction à celles-ci.

Ce livre, écrit dans une forme simple, est destiné aux jeunes lecteurs possédant les connaissances élémentaires de physique et de chimie qui correspondent au premier cycle de l'enseignement secondaire.

CE QUE MURMURE LE RUISSEAU QUI COULE DANS LE RAVIN

Comment l'eau érode et entraîne les parcelles de terrain. L'affouillement des berges. Obstructions. Les ravins et leur croissance. La formation des gorges. Le transport des matériaux. Les régions d'érosion et de dépôt. Les méandres. Les deltas. Les bas-fonds et les îles. Les terrasses fluviatiles. Les bases d'érosion. Les rapides. Les chutes d'eau. Les crues des eaux. Les torrents de boue. Les alluvions et les proluvions.

Il pleut. Les rafales de vent jettent sur les vitres de grosses gouttes d'eau qui courent en petits filets vers le bas des fenêtres. D'épais nuages couvrent le ciel, les rues sont boueuses, sales et désagréables. Par un temps pareil il fait bon rester chez soi, au coin du feu, en attendant que la pluie cesse.

Mais surmontons ce désir, chaussons de hautes bottes, prenons un parapluie ou un imperméable et sortons ou, mieux encore, quittons la ville pour les champs. Pendant la pluie nous pourrions observer comment l'eau courante travaille à transformer la surface de la Terre. Nous le verrons d'autant mieux que la pluie sera plus forte.

L'affouillement des berges. Le travail de l'eau à la surface de la terre s'observe facilement un peu partout. Même en ville, où le sol est caché sous l'asphalte ou les pavés, nous verrons que les ruisseaux qui coulent dans les caniveaux portent une eau trouble; elle est salie par les parcelles de sable, de poussière, par les divers détritiques dont la pluie lave les trottoirs et qu'elle entraîne à l'égout. Ce travail est encore plus visible en rase campagne, dans les labours et les bois, où les averses font courir dans chaque rigole, dans chaque sillon des ruisselets très troubles, qui creusent le terrain et en emportent des parcelles. La couleur de l'eau nous

permet de définir aisément la nature du sol: si les sillons sont creusés dans le terreau, l'eau sera grise, s'ils passent dans le sable ou l'argile, elle sera teintée de différentes nuances de gris ou de jaune.

Plus l'eau coule vite, plus elle peut emporter de parcelles, car plus grande alors est sa force portante, force qui détache et entraîne les petites particules, ainsi que sa force érosive, autrement dit son action sur le sol meuble des rives.

Suivons un des ruisselets que la pluie fait courir sur un terrain mou — terreau, sable ou sable argileux. Si l'inclinaison du sol est très faible, presque imperceptible, l'eau coule lentement et le creux du sillon est insignifiant. Mais voilà que la pente devient plus raide et déjà le ruisseau commence à murmurer, court plus vite et son lit se creuse. Nous remarquons que ses parois sont devenues verticales et si nous demeurons pendant un certain temps à les observer, nous verrons que, de-ci de-là, des mottes de terre se détachent, tombent dans l'eau, se détrempent et, une à une, sont emportées par le courant. Si l'inclinaison du terrain est assez forte on voit même apparaître de petites chutes d'eau.

Nous avons vu en miniature l'action de l'eau courante, l'érosion et le transport des menues parcelles de terrain.

Les ruisselets d'eau de pluie, suivants les sillons et les rigoles naturelles, s'unissent en ruisseaux, les ruisseaux en rivières, les rivières en fleuves. Les fleuves, enfin, se jettent dans un lac ou une mer, dont l'eau stagnante recueille tout le matériau, tous les troubles que portent les fleuves.

Vous pouvez demander: comment se comportent les rivières et les fleuves par beau temps? Leur eau paraît limpide, on peut la boire et, recueillie dans un verre, elle semble absolument transparente et incolore. Mais ce n'est qu'une apparence. On ne trouve une eau tout à fait pure que dans les ruisseaux et les petites rivières coulant très lentement à travers les prés, entre des rives molles, couvertes d'herbes et de broussailles et défendues par elles contre l'action destructrice de l'eau. Mais cette eau-là n'est pas absolument pure, elle non plus, car elle contient en dissolution une très faible quantité de sels provenant du sol qu'elle traverse. Portez cette eau dans un laboratoire d'analyse chimique et l'on vous dira que, quoique parfaitement douce au goût, elle contient tant de milligrammes de sels par litre.

Dans bien des fleuves l'eau, même à première vue, paraît légèrement trouble, ce qui est facile à voir en se baignant ou en

se promenant en barque. Déjà à un mètre de profondeur on distingue à peine le fond, ce qui prouve que l'eau n'est pas tout à fait transparente. Si, cependant, vous en emplissez un verre, vous ne pourrez vous en apercevoir. Il y a des fleuves dont l'eau est tout à fait trouble, comme par exemple la Koura, dans la Transcaucasie, qui est gris foncé, l'Amou-Daria en Asie centrale dont l'eau est couleur café au lait, ou le Hoang-ho en Chine, jaune-brun ("hoang" signifie jaune en chinois). Les eaux troubles ou boueuses de tels fleuves contiennent non seulement des sels en dissolution, mais aussi plus ou moins de particules de sable ou d'argile qu'elles charrient, comme les ruisseaux de pluie.



Fig. 1. Berge sapée par le courant.

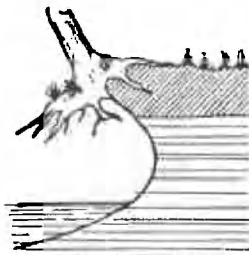


Fig. 2. Berge affouillée avec une souche et les racines d'un arbre.

La force du courant sape les rives partout où elles ne sont pas protégées par les herbes ou les arbustes; les plantes, dont les racines forment en s'enchevêtrant une masse compacte, sont une bonne défense contre l'érosion. Aux endroits où l'herbe est absente ou rare, les roches formant les rives cèdent à l'eau plus ou moins rapidement, surtout pendant les crues printanières, ainsi qu'en été et en automne, quand, après de fortes pluies, les fleuves portent beaucoup plus d'eau que d'habitude et inondent une partie des zones riveraines. De plus, quand le niveau du fleuve monte, la vitesse du courant augmente, ce qui accélère l'érosion.

Les bords des rivières et des fleuves qui sont constitués par des roches meubles, — sables, argiles, sables argileux, galets dont les divers grains (graviers, pierres erratiques) ne sont pas soudés par un ciment quelconque, — sont soumis à une érosion intense. L'eau affouille peu à peu la base des berges, creusant des rigoles de plus en plus profondes, et les couches supérieures, privées

d'appui, glissent ou s'effondrent par gros blocs qui, rapidement détrempés, sont emportés petit à petit par le courant (fig. 1).

J'ai eu l'occasion, une fois que je passais la nuit sur la rive de l'Amou-Daria, d'observer la vitesse avec laquelle étaient détruites les rives de ce fleuve. Dans le silence de la nuit on entendait très nettement le bruit des blocs de terre qui, sapés par l'eau, s'effondraient de-ci de-là en amont et en aval. Les rives y sont



Fig. 3. Obstruction sur la rivière Poldnevny Tagoul dans la chaîne Salair, Sibérie occidentale.

formées de sables, de limons et d'argiles tendres, et le courant est rapide. C'est pourquoi les eaux de l'Amou-Daria sont si boueuses.

Si la surface des rives meubles, facilement délavables, est couverte de buissons et d'arbres qui avec les herbes renforcent le sol, il se forme au-dessus des couches détruites comme un auvent qui, au bout d'un certain temps, finit par s'effondrer (fig. 2). La couche végétale cède peu à peu, elle aussi, et le courant emporte le buisson ou l'arbre. Pendant les crues de printemps, tous les cours d'eau de quelque importance, en particulier ceux qui traversent des régions boisées, charrient une grande quantité de ces arbres et arbrisseaux morts qui échouent souvent sur les bas-fonds et les bancs de sable ou s'entassent près des rives dans les coudes

des fleuves, surtout lors de la baisse des eaux. On rencontre assez souvent dans l'Oural et en Sibérie des obstructions, des barricades entières de ces arbres morts qui, s'accumulant en désordre dans les courbes ou dans les passes étroites des cours d'eau, les



Fig. 4. Défilé de la rivière Sarydjaz dans le Tian-Chan.

rendent impraticables pour les barques ou les radeaux. Pour les déblayer il faut être muni d'une scie et d'une hache et perdre pas mal de temps (fig. 3). Les grands fleuves qui se jettent dans l'océan Glacial Arctique — la Dvina du Nord, la Pétchora, l'Obi, l'Ienisséï, la Léna, etc. — jettent à la mer une grande quantité d'arbres qui croissaient jadis sur leurs berges...

Pendant les tempêtes, le ressac rejette ces arbres, déjà sans écorce et presque sans branches, sur le rivage où ils recouvrent

de grandes surfaces, fournissant les habitants de la toundra riveraine de matériaux de construction et de bois de chauffage.

Les rives constituées de roches dures, grès, schistes, calcaires, granit résistent mieux à l'érosion, mais l'action de l'eau, bien que fortement ralentie, ne cesse pas pour autant. Au cours des siècles et des millénaires l'eau se creuse un lit dans ces roches également. Dans les montagnes, constituées habituellement de roches dures, nous trouvons cependant des vallées plus ou moins profondes, creusées par les fleuves, les rivières et les ruisseaux. Dans les régions où les roches sont particulièrement dures, les vallées se transforment en défilés aux parois raides, à pic, ou parfois même surplombantes (fig. 4, 5, 6). Citons, par exemple, le défilé Darialskoïé du Térék, les défilés Cassarskoïé et inférieur de l'Ardon dans le Caucase. Le défilé le plus connu pour son énorme profondeur et sa grande longueur est le fameux canyon du Colorado, en Amérique du Nord. Ses pentes abruptes, souvent verticales, présentent un exemple intéressant de l'alternance des roches dures et meubles, disposées en couches horizontales. Les roches dures résistent mieux à l'érosion et forment des rives aux parois verticales; les couches plus tendres sont plus facilement érodées, et s'éboulent en constituant des berges à pente plus douce. C'est pourquoi nous voyons dans les vallées ou les défilés où une telle alternance a lieu, des étages superposés de parois verticales plus ou moins hautes de roches dures et des pentes moins escarpées, souvent couvertes d'herbes, d'arbustes et même d'arbres, qui correspondent aux roches moins dures (fig. 7).

Les ravins. La population du centre de la partie européenne de l'U.R.S.S. et les Ukrainiens connaissent bien les ravins. Ce sont des fentes plus ou moins profondes, longues et ramifiées qui sont creusées dans les terrains meubles par les eaux courantes. Au fond de certains d'entre eux coulent des ruisseaux, d'autres sont desséchés en été mais reçoivent pendant les pluies l'eau de tous les ruisseaux et ruisselets des alentours.

Les ravins sont un exemple très caractéristique de l'action érosive de l'eau courante. Ils causent un préjudice énorme à l'agriculture.

Les ramifications des ravins pénètrent comme des tentacules dans les prairies, les labours, les jardins, les villages. De toutes parts des rigoles, des fondrières, des combes débouchent dans le ravin, y amenant l'eau des neiges et des pluies. Ces fondrières et combes, s'approfondissant au détriment du terrain et formant

peu à peu de nouvelles branches du ravin, détruisent morceau par morceau les surfaces arables et les pâturages et rendent malaisée la culture des terres voisines.

Outre qu'ils rendent les terrains difficilement cultivables, les



Fig. 5. Gorge épigénétique (creusée dans le fond d'une vallée glaciaire), Saïan orientaux.

ravins sont encore nuisibles du fait que l'eau de pluie s'y écoule rapidement. Sans eux, elle demeurerait dans les champs et imprégnerait le sol. Les ravins ouvrent également une sortie aux eaux souterraines, leur permettant de s'écouler rapidement et desséchant de cette façon toute la région avoisinante (fig. 8 et 9).

C'est pourquoi il faut combattre l'expansion des ravins. Il est indispensable de fixer les endroits où les fondrières se transforment en combes. Ce sont les points les plus dangereux des ravins. Les

ruisselets forment dans les fondrières de petites cascades qui, creusant rapidement le sol et se déplaçant vers l'amont, montrent très bien comment croît la branche du ravin, comment la fondrière s'élargit, s'approfondit et s'allonge, s'étendant sur une surface de



Fig. 6. Défilé Ouzoun-Bom de la rivière Argout, Altaï.

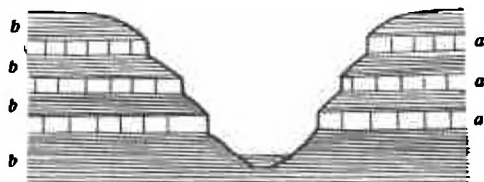


Fig. 7. Coupe transversale d'une vallée fluviatile.

a — couches de roches dures, *b* — couches de roches tendres.

plus en plus grande. Les pentes dénudées des ravins qui, sous l'action de l'eau de pluies, perdent les couches de terre molle qui les recouvrent et s'élargissent, doivent être plantées de buissons et d'arbres. Avec le temps la plupart des ravins peuvent, par ce moyen qui exige relativement peu de travail et de ressources,

être transformés en bocages. Ainsi, ils deviendront inoffensifs et permettront plus tard d'obtenir du bois.

Le transport des matériaux. Nous avons vu l'action destructrice de l'eau de ruissellement. Suivons maintenant le sort des produits de ce travail. Les petites parcelles de sable et d'argile que l'eau de pluie apporte aux rivières et aux fleuves et celles que les fleuves eux-mêmes arrachent de leurs propres rives, parcourent avec l'eau



Fig. 8. Racines d'un ravin à progression rapide sur les bords de la rivière Tomi en amont de Tomsk.

une distance plus ou moins grande, suivant leurs poids. Les grains de sables les plus gros se déposent assez vite au fond, les grains plus fins et plus légers feront un plus long voyage. Relativement peu d'entre eux seront immédiatement entraînés dans le lac ou la mer où se jette le fleuve; ce seront ceux qui atteindront le fleuve au printemps, pendant la fonte des neiges ou avec l'eau de pluie, au moment où les cours d'eau sont en crue et coulent plus vite. L'eau des fleuves est alors bien plus boueuse qu'en temps ordinaire. Ajoutons que les parcelles que charrient les rivières et les fleuves troubles et rapides comme la Koura, le Térék, l'Amou-Daria, le Kouban atteignent rapidement la mer. Le Hoang-ho, ce fleuve

de Chine, apporte dans le Pacifique une telle quantité de limon que les eaux de l'océan deviennent également troubles sur une étendue considérable appelée de ce fait mer Jaune. Les masses de limon que les fleuves entraînent par an vers les mers sont énormes. En mesurant les quantités de limon pour un volume déterminé d'eau à différents moments de l'année et en les multipliant par les quantités d'eau que le fleuve déverse dans le lac ou la mer en un an, on obtient les chiffres suivants (en mètres cubes de limon):

Le Rhin apporte dans le lac de Constance	8 172 000
Le Rioni apporte dans la mer Noire	8 000 000
Le Gange apporte dans l'océan Indien	177 000 000
L'Amou-Daria apporte dans la mer d'Aral	44 854 000

Le Hoang-ho jette quotidiennement dans la mer Jaune pendant ses crues 29 160 000 mètres cubes, et à basses eaux, 72 576 mètres cubes de vase, c'est-à-dire 416 fois moins. Cet exemple montre l'énorme différence entre le travail d'un fleuve pendant les crues et à régime ordinaire. Les savants n'ont pas encore déterminé combien de jours par année en moyenne durent les crues du Hoang-ho. Si nous admettons qu'elles durent trente jours seulement, et la période d'eau basse 335 jours, nous en viendrons à la conclusion que ce fleuve jette à la mer plus de 900 millions de mètres cubes



Fig. 9. Deux racines d'un ravin sur le plateau Oust-Ourt, Kazakhstan.

de limon par an. Cette quantité de limon suffirait à couvrir une surface de 1 kilomètre carré d'une couche de 900 mètres, c'est-à-dire qu'on pourrait en faire une montagne assez haute. Même le Rioni, pourtant relativement clair, porte à la mer Noire, et le Rhin au lac de Constance, une quantité de dépôts dont on pourrait couvrir la même surface à une hauteur de huit mètres. Cela nous permet de nous représenter nettement les masses de matériaux que les fleuves du monde entier transportent annuellement vers les lacs et les mers. Nous ne parlons pas des dépôts qui se forment dans le lit des fleuves mêmes, ni de ceux qui pendant les crues se déposent sur les terres dites submersibles.

Les régions d'érosion et de dépôt. Suivons à présent un fleuve de sa source à son embouchure, pour mieux comprendre le caractère de ce courant d'eau qui coule, creuse et transporte.

Le système de chaque fleuve est composé de branches plus ou moins nombreuses, et il n'est pas toujours facile de trouver laquelle est la principale et digne de porter le nom du fleuve, Volga, Dniepr ou Don, par exemple, que nous voyons sur la carte. Chaque branche commence par une petite source dans quelque ravin ou s'écoule d'un étang ou d'un lac, et n'est d'abord qu'un ruisseau qui court en murmurant au fond d'une vallée boisée ou champêtre. Plusieurs ruisselets, en s'unissant, forment un ruisseau, et plusieurs ruisseaux — des rivières qui se joignent en un fleuve. Les ruisseaux, rivières et fleuves creusent ou déposent les matériaux, ce qui dépend en tout premier lieu de l'inclinaison du terrain où ils passent et, partant, de la vitesse de leur courant. Plus l'eau coule vite, plus le lit du fleuve s'enfonce dans les roches qui constituent le fond de la vallée. C'est vers la source, habituellement, que la pente est la plus forte — c'est une région d'érosion. Elle est imperceptible à première vue. L'eau dans le cours d'eau semble limpide et ne devient trouble que pendant les pluies et les fontes de neige, quand les eaux qui affluent des terrains environnants apportent avec elles des matières qui les salissent.

Même dans les montagnes, où les cours supérieurs des fleuves sont des ruisseaux qui dévalent rapidement les flancs des montagnes en suivant des lits plus ou moins profondément creusés dans le sable, le gravier ou les galets, donnant naissance par endroits à des cascades ou des chutes d'eau, l'eau par temps sec semble transparente. Elle creuse cependant, mais très lentement. L'érosion est bien visible pendant les pluies et la fonte des neiges, quand le torrent grossi s'attaque aux rives tantôt ci tantôt là, roulant



Fig. 10. Le cours supérieur de la rivière Youi-Tas, Alataou de Dzungarie, Kazakhstan.

les galets et mêmes des blocs, et les déplaçant peu à peu d'amont en aval. L'action destructive de l'eau s'amplifie alors sensiblement (fig. 10).

Plus bas, lorsque les ruisseaux et les rivières réunis forment déjà un cours d'eau considérable, la pente devient moindre, et l'eau, coulant plus lentement, n'est déjà plus capable de creuser en profondeur. C'est là que commence la zone d'érosion latérale; le fleuve commence à zigzaguer en attaquant tantôt une rive tantôt l'autre. Ses courbes, peu sensibles au début, s'accroissent, le courant est plus rapide et son lit est plus profond près de la rive concave, alors que la rive convexe, près de laquelle le lit est moins profond et le courant plus faible, s'accroît grâce à l'apport des matériaux charriés par l'eau. La rive que le courant ne cesse de délayer recule peu à peu et les courbes, de plus en plus accentuées, deviennent en fin de compte de véritables boucles (fig. 11-13). Ces boucles sont appelées méandres, du nom du fleuve de Grèce où ils sont très prononcés.

Sapant tantôt la rive droite, tantôt la rive gauche, le fleuve élargit peu à peu sa vallée, ce qui fait que l'on peut appeler la région d'érosion latérale région d'élargissement de la vallée. Le lecteur peut observer des méandres plus ou moins développés dans

les vallées de la plupart des fleuves et rivières de petite et moyenne grandeur coulant dans les plaines. Un excellent exemple — les méandres de la Moskova dans les limites de notre capitale (fig. 12).

Une des conséquences fréquentes du développement des méandres est la formation de petits lacs et de petites baies. Pendant les crues, quand les cours d'eau débordent, ils peuvent se frayer un chemin en ligne droite en coupant la boucle du méandre et conserver cette direction rectiligne après la baisse des eaux. L'entrée de la boucle s'encombre peu à peu par les dépôts de sable, de limon, de cailloux, et la boucle se transforme progressivement en un lac

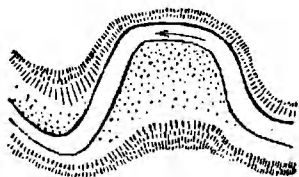


Fig. 11. Formation d'un méandre dans le lit d'un cours d'eau.

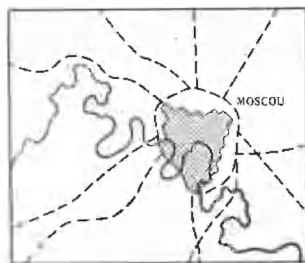


Fig. 12. Les méandres de la Moskova.

allongé lié les premiers temps avec le fleuve (fig. 14). Mais l'eau stagnante de ce lac est favorable au dépôt des matériaux par le fleuve et toute communication avec celui-ci est bientôt coupée, soit à l'entrée même du lac, soit à une certaine distance de celle-ci. Dans ce dernier cas une baie se forme, très commode pour le stationnement hivernal des bateaux, mais qui devient assez rapidement impraticable à cause du dépôt intensif qui a lieu en eau tranquille. On appelle ces méandres qui se sont séparés du lit des cours d'eau — fausse rivière. Ils sont progressivement envahis par les algues, les roseaux, s'ensablent, se transforment en marais, puis disparaissent.

Ce serait une erreur de penser que dans les zones d'affouillement les vallées s'approfondissent seulement, tandis que dans les zones d'érosion latérale seul l'élargissement a lieu. Ici et là, outre l'érosion, un dépôt de matériaux s'effectue; partout où le courant se ralentit, on voit se déposer de la vase, du sable, des galets.



Fig. 13. Méandres et bras morts de la rivière Argoun, Transbaïkalie.

Même dans le lit des torrents montagneux nous ne voyons pas partout affleurer les roches dures qui forment les parois de la vallée; en de nombreux endroits nous trouvons du sable, des galets, du gravier. Mais ces matériaux n'y demeurent que provisoirement; la prochaine crue les emportera en totalité ou en partie pour les déposer ailleurs, et des particules isolées seront emportées même pendant l'eau basse. Dans les zones d'élargissement des vallées, les matériaux qu'entraîne le courant se déposent près des rives convexes, des sinuosités et y demeurent un temps indéterminé. Dans ces zones, outre l'érosion latérale, le dépôt des matériaux a lieu, et tout le fond de la vallée peut être constitué par une couche plus ou moins épaisse de ces matériaux.

Mais nous trouverons la zone de dépôt proprement dite dans le cours inférieur du fleuve, où la pente de son lit est plus faible, le courant plus lent, et où l'eau ne peut plus en temps ordinaire exercer une action destructrice sur les rives. C'est le matériau le plus fin qui se dépose ici, apporté par les eaux du cours moyen et supérieur; le matériau plus grossier et partant plus lourd, graviers et galets en majeure partie, se dépose dès le cours moyen. Tout le fond du lit et ses rives sont faits de ce matériau — limon et sable, avec parfois des couches interposées de graviers et de galets. Même pendant les crues, lorsque le fleuve déborde, il dépose la plupart du temps au lieu d'éroder.

Les deltas. Mais de nombreux fleuves ne parviennent pas à se débarrasser de tout le matériau qu'apporte le courant, surtout s'il est abondant. Nous avons cité plus haut des chiffres montrant l'énorme quantité de vase que rejettent certains fleuves dans les lacs ou les mers. Une partie importante de ces matières se dépose dans l'embouchure même du fleuve, dans les eaux calmes, et forme peu à peu ce qu'on appelle un delta. Ce dernier a, grosso modo, une forme triangulaire dont le sommet est dirigé vers l'amont, d'où son nom, de la lettre grecque "delta" majuscule, qui a la forme d'un triangle (Δ). Se formant de dépôts de vase, de sable, de galets même (pour les fleuves dont le courant est encore assez fort vers l'embouchure et capable d'entraîner un

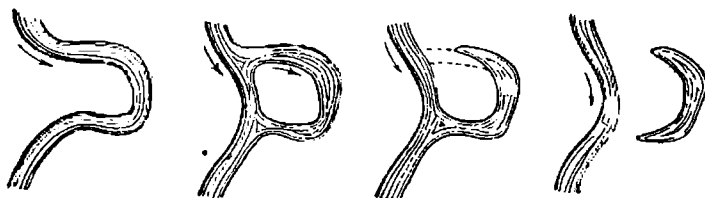


Fig. 14. Transformation d'un méandre en un bras mort.

matériau grossier), le delta grandit peu à peu, empiétant sur le lac ou la mer et s'élevant au-dessus des eaux telle une plaine basse souvent marécageuse (le fleuve Rioni, par exemple). Dans les limites du delta, le fleuve se ramifie en bras souvent sinueux, changeant de place durant les crues et laissant après eux de petits lacs. Quand les eaux du fleuve en crue inondent le delta, les parties submergées reçoivent un dépôt supplémentaire qui demeure après la baisse des eaux, ce qui fait que le delta s'élève toujours plus au-dessus du niveau du fleuve; il se couvre peu à peu d'herbes, de buissons, d'arbres même. Nombre de grands fleuves ont des deltas très importants: la Volga, par exemple, dont le delta est formé d'une centaine de bras et canaux, la Néva, sur le delta de laquelle Léninegrad est bâti, la Léna, le Nil, le Mississipi. Les deltas croissent également sous l'eau et les mers s'ensablent autour d'eux (fig. 15).

Les îles et les bas-fonds. Dans les cours moyens et surtout inférieurs de nombreux fleuves, nous trouvons souvent des îles, constituées pour la plupart d'alluvions, rarement de roches dures. Les îles rocheuses sont des saillies de roches, dures par excellence,

qui ont résisté à l'érosion lors de la formation du lit du fleuve. Ces îles sont nombreuses, par exemple, dans le cours moyen de la rivière Katoune dans l'Altaï, là où celle-ci se débat impétueusement dans ses rapides. Certaines d'entre elles ne se présentent que comme des dos d'ânes et des rochers à fleur d'eau, d'autres s'élèvent sensiblement au-dessus du niveau du fleuve et portent

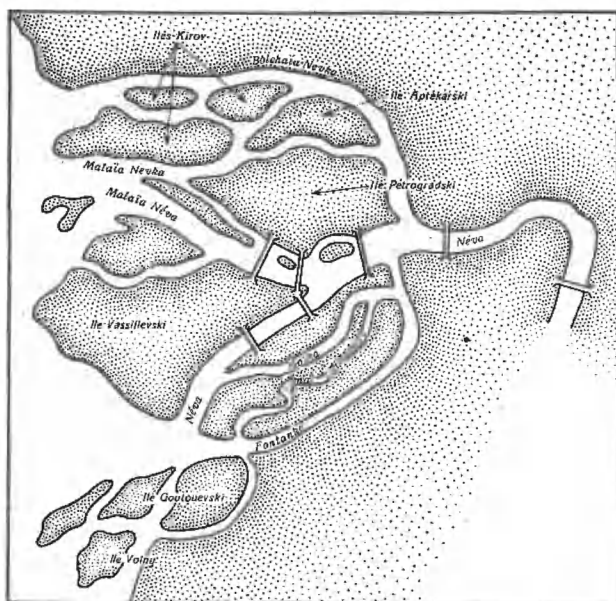


Fig. 15. Le delta de la Néva.

même des arbres. Bien plus souvent les îles sont formées de sables et de galets et naissent, la plupart du temps, de bas-fonds qui apparaissent aux endroits où le courant se ralentit et un dépôt de matériaux a lieu. Les bas-fonds, en croissant, dépassent le niveau des eaux basses et se couvrent d'herbes, d'arbustes et d'arbres; pendant les crues, les îles sont souvent submergées, ce qui contribue à leur croissance, car les buissons et les arbres freinent le courant. Nombre d'îles se sont formées autour d'épaves, comme par exemple un arbre déraciné; le fleuve l'entraînait en période de crue, il s'est accroché par ses racines et a échoué lors de la baisse des eaux, ralentissant le courant et favorisant le dépôt d'alluvions. Il y a des îles qui s'étendent sur des centaines et des milliers de

mètres, coupant le fleuve en deux ou plusieurs bras; certains de ces derniers s'ensablent peu à peu et cessent d'être navigables.

Les terrasses fluviales. Sur les pentes de nombreuses vallées nous voyons des gradins que l'on appelle terrasses. Les unes sont formées d'espèces rocheuses, d'autres de galets, de sable, de limon. La terrasse la plus proche du lit du fleuve s'élève au-dessus du niveau de l'eau en formant une berge ou un escarpement assez bas; sa surface plane porte des prés, des buissons, des bosquets. Elle s'appelle terre submersible; pendant les crues elle est partielle-

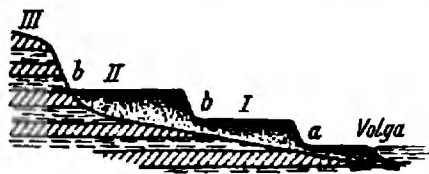


Fig. 16. Les terrasses de la Volga.

a — terres submersibles avec barre et bras morts: *I* — première terrasse, *II* — deuxième terrasse, *III* — berge; *b* — marécages.

ment ou totalement submergée. La terrasse suivante s'élève au-dessus des terres submersibles à une hauteur variable, mais n'est jamais couverte par les eaux en crue; cette terrasse porte les labours, les villages et les villes. Elle est souvent dominée par une, deux ou plusieurs terrasses de différente hauteur (fig. 16).

Quelles sont donc les forces qui ont créé ces gradins, semblables aux marches d'un escalier cyclopéen? C'est le cours d'eau lui-même, par érosion et dépôt. Leur étude nous permet d'éclaircir l'histoire de la vallée du fleuve. Chaque terrasse est un témoignage d'un brusque changement des conditions de ce développement. Les terrasses rocheuses montrent qu'après une certaine période pendant laquelle le fleuve ne faisait que s'élargir en cet endroit par érosion latérale, des causes quelconques l'ont forcé à creuser de nouveau son lit dans les roches dures qui constituent le fond de la vallée. Ce sont les terrasses d'érosion (fig. 17).

Les terrasses formées d'alluvions — couches de sable, de limon, de galets, montrent que durant une période plus ou moins longue, dont nous pouvons juger d'après la hauteur de la terrasse, le fleuve, dans cette partie de son cours, n'entraînait pas les matériaux

qui constituaient le fond de son lit, mais au contraire déposait des alluvions, après quoi une force quelconque l'a astreint à creuser de nouveau son lit, à attaquer les alluvions qu'il avait lui-même apportées (fig. 18).



Fig. 17. Terrasse d'érosion et gorge, Saïan oriental.

Qu'est-ce qui a donc pu forcer le fleuve à modifier le caractère de son travail ? On a supposé tout d'abord qu'en fonction du climat devenu plus humide, plus riche en précipitations atmosphériques, le fleuve, à l'origine de faible débit et partant "débile", est devenu plus puissant et s'est mis à recreuser ses propres alluvions. Dans certains cas, cette supposition est confirmée. L'étude de l'époque quaternaire, qui a commencé avec l'apparition de l'homme et continue jusqu'à présent, montre que les époques de climat sec

alternaient avec des périodes plus humides. Nous en reparlerons d'ailleurs plus bas. Mais, dans la plupart des cas, la cause de la modification du travail du cours d'eau était tout autre et plus importante. C'était l'accroissement de la vitesse du courant, dont



Fig. 18. Terrasse de la rivière Aravan dans son cours supérieur.

dépend pour l'essentiel le travail de l'eau. La vitesse, à son tour, a pu croître par suite d'une augmentation de la déclivité du lit.

Cette inclinaison, comme nous le savons, est plus grande dans le cours supérieur, plus faible dans le cours moyen et minime dans le cours inférieur; en général, si nous traçons à l'échelle la ligne que suit le lit du fleuve de son embouchure à sa source, nous obtiendrons une courbe régulière (fig. 19), qu'on appelle courbe ou profil d'équilibre. Le niveau du lac ou de la mer où se jette

le fleuve est appelé niveau de base, étant donné que tout le travail du cours d'eau s'effectue au-dessus de ce niveau et est impossible au-dessous de celui-ci. Supposons que le niveau baisse, soit que le lac se dessèche, soit que la mer se retire. La baisse du niveau de base aura une répercussion immédiate sur le travail du fleuve; dans son cours inférieur la courbe régulière se brise, pour ainsi dire, la pente du lit s'accroît brusquement et le fleuve, qui, dans son cours inférieur, ne faisait que déposer, commence à creuser, s'incrustant dans ses propres alluvions. Cette zone d'érosion se déplace d'aval en amont, car le fleuve n'élabore une

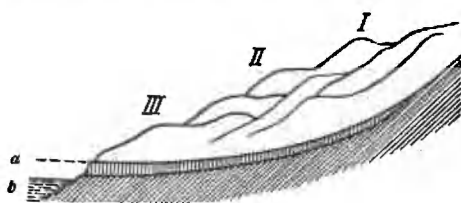


Fig. 19. Profil d'équilibre du lit d'un cours d'eau.

I' — région d'alimentation, *II* — région d'érosion latérale, *III* — région de dépôt; *a* — ancien niveau de base, *b* — nouveau niveau de base; la terrasse est couverte de hachures verticales.

nouvelle courbe d'équilibre que de bas en haut. Ce processus dure très longtemps, des siècles entiers et parfois des millénaires. Creusant son lit dans les alluvions apportées par lui antérieurement, le fleuve en laisse une partie sur ses deux rives sous forme de gradins, terrasses, dont la hauteur diminue progressivement vers le haut

de la vallée et dépend, dans le bas, de la baisse du niveau de base (fig. 19).

Ce même processus — baisse du niveau de base et creusement du lit par le fleuve comme conséquence de ce changement de niveau — peut se répéter plusieurs fois, ce qui fait que la vallée du fleuve peut se trouver encastrée entre une série de terrasses de différente hauteur.

Mais le même résultat — augmentation de la pente du lit et érosion avec élaboration d'une nouvelle courbe d'équilibre — peut être acquis non pas par une baisse du niveau de base mais par un soulèvement de toute la contrée. Mais si le niveau de base ne varie pas, le relief du pays se modifiant seul, le soulèvement étant plus prononcé vers la source et insensible vers l'embouchure, le processus d'érosion commencera non pas à l'embouchure, mais vers la source où la pente s'est déjà accrue. L'apparition des terrasses aura lieu de la source vers l'embouchure. L'étude des terrasses le long des cours d'eau, de leur hauteur et de leur situation permet

de déterminer les causes de leur apparition : abaissement du niveau de base ou soulèvement de la contrée (fig. 20).

Les rapides. Dans les cours d'eaux de montagnes on trouve souvent, même dans les parties moyennes et inférieures de leur cours, des secteurs où le courant, tranquille auparavant, devient tumultueux, des rochers apparaissent dans le lit, ne disparaissant sous l'eau que pendant les crues, parfois même ce sont des groupes de rochers, plus ou moins polis et rongés par l'eau. Ces zones, appelées rapides, sont un obstacle important pour la navigation. Les pilotes conduisant les embarcations dans ces parages



Fig. 20. Variation du profil d'équilibre lors d'un soulèvement d'amplitude a dans le cours supérieur du fleuve.

AA — courbe ancienne; BA — courbe après soulèvement; la terrasse est hachurée verticalement.

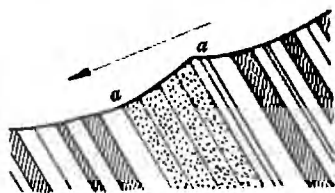


Fig. 21. Formation de rapides par des roches dures dans le lit d'un cours d'eau ($a-a$).

doivent faire preuve d'une habileté consommée et d'une connaissance parfaite du relief du lit aux divers niveaux de l'eau pour pouvoir mener à bon port les radeaux, les barques ou bateaux à travers les rapides. Certains rapides ne sont praticables que pendant les crues, sur d'autres des embarcations et des hommes périssent chaque année, d'autres enfin sont infranchissables. Ils apparaissent dans les endroits où, parmi les roches qui forment le lit du fleuve, se trouvent des roches plus dures que celles qui sont situées plus haut et plus bas que les rapides. Ces roches, plus dures, sont moins sujettes à l'érosion. Il y a beaucoup de rapides sur les fleuves et les rivières sibériens — l'Énisséï, l'Angara, la Podkamennaïa Tougouska et la Tougouska Inférieure, le Vitim, le Viliouï, la Bia, la Katoune; dans le cours moyen de l'Angara, les rapides de Padoune et Chaman sont très connus.

Dans les rapides, l'eau, auparavant calme, accélère sa course, s'agite, forme des remous, écume en contournant les pierres ou en passant par-dessus, semble bouillir pour redevenir tranquille

une fois les rapides dépassés. La vitesse du courant dans les rapides prouve que la déclivité du terrain s'y accentue brusquement; c'est une zone de roches particulièrement dures rompant la régularité de la courbe d'équilibre et y produisant une cassure (fig. 21). Au-dessus et au-dessous du rapide, la rivière se trouve dans une zone d'érosion latérale ou même de dépôt, alors que dans les limites du rapide, l'évolution de son lit est retardée par suite de la dureté des couches rocheuses, et la rivière creuse encore son lit en profondeur (fig. 22).

Dans les fleuves de plaine les rapides sont très rares. Ce sont, par exemple, les rapides du Dniepr près de l'ancien village de Kitchkas, constitués par des saillies de granit. Ils présentaient un sérieux obstacle à la navigation. Le barrage gigantesque de la centrale hydro-électrique du Dniepr (Dniéproguès) érigé sur cet emplacement a fait monter le niveau de l'eau; les pierres et les rochers ont disparu; une partie de ces roches existe toujours en aval de la centrale, mais les bateaux les évitent en passant par un canal et un système d'écluses.

Il est souvent plus facile de détruire les rapides, en les faisant sauter.

Les chutes d'eau. Les chutes d'eau sur les rivières et les fleuves sont un phénomène encore plus grandiose et impressionnant.



Fig. 22. Rapides sur la rivière Birious, Saïan oriental.



Fig. 23. La cascade Kok-Koul, Altaï.

Leur cause est également un affleurement de roches dures dans le lit du cours d'eau mais sous forme d'un gradin plus ou moins élevé d'où l'eau se précipite. Les chutes d'eau sont nombreuses sur maints torrents et rivières de montagne, notamment du Caucase, de l'Altaï, de la Suisse (fig. 23). Ils sont plus rares sur les grands fleuves. Les plus connus sont les cataractes du Niagara en Amérique du Nord et les chutes Victoria sur le Zambèze en Afrique du Sud. La chute d'eau Kivatch en Carélie est formée de plusieurs gradins, et l'Imatra en Finlande n'est, somme toute, qu'un rapide très raide.

Les cataractes du Niagara (fig. 24) ont une hauteur de 50 mètres; elles sont séparées par l'île aux Chèvres en deux parties: la partie canadienne, en forme de fer à cheval, large de 792 mètres et la partie américaine, de 427 mètres. En aval de la chute d'eau, la rivière coule dans un défilé de 10 kilomètres.

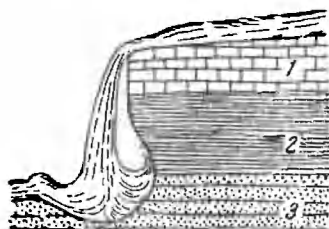


Fig. 24. Coupe des chutes du Niagara.

1 — calcaires durs; 2 — schistes tendres; 3 — grès tendres.

L'eau tombant d'une grande hauteur acquiert une force de destruction considérable; c'est pourquoi au pied des chutes d'eau se forment souvent des fosses profondes et des tourbillons qui détruisent en partie le gradin d'où tombe l'eau et, favorisant les éboulements, concourent à faire reculer les chutes d'eau vers l'amont. Le Niagara recule chaque année de 1,5 mètres dans sa partie canadienne et de 0,9 mètre dans sa partie américaine; le défilé tout entier de 10 kilomètres de long a été creusé par l'eau lors de ce recul.

La chute Victoria sur le Zambèze est encore plus grandiose; elle est large de près de 1800 mètres et a une hauteur de 120 mètres, ainsi que la chute de Iguazu à la frontière du Brésil et de l'Argentine qui atteint 1500 mètres de large et 65-70 mètres de haut. Le Zambèze, au-dessous de la cataracte, coule dans un défilé profond creusé par lui et formant deux coudes très brusques.

Les rapides se combinent parfois avec les défilés. Ainsi, par exemple, le défilé Darialskoïé du Térék dans le Caucase présente une série de rapides. Le défilé le plus grandiose est celui du Colorado en Amérique du Nord: sa longueur est de 320 kilomètres avec une profondeur de 900 à 1800 mètres. Ce fleuve, sur toute sa longueur,

comporte des rapides. Sa largeur n'est que de 60 à 90 mètres. On appelle également les défilés longs et profonds canyons.

Dans les rapides, sous les chutes d'eau et en général dans les endroits où le courant est accéléré, l'eau creuse des fosses que l'on appelle marmites de géants (fig. 25). Le courant d'eau imprime un mouvement giratoire aux rochers d'espèces dures qui gisent isolément au fond du lit. Peu à peu ils usent les roches sous-jacentes et y pratiquent un creux qui croît de préférence en profondeur et adopte en fin de compte la forme d'une marmite aux parois verticales et au fond concave. Le rocher, à son tour, s'use un peu lui-même. Plus l'écart entre la dureté du rocher et celle de la roche mère est grand, et plus vite la marmite se formera. Ces fosses apparaissent parfois en groupes. Si ces groupes se trouvent sur les berges au-dessus du niveau maximum des crues, cela prouve que le lit du fleuve s'est approfondi récemment.

Les crues. Nous n'avons jusqu'à présent examiné le travail de l'eau qu'en régime normal, quoique les crues aient été plus d'une fois mentionnées. Il nous faut dire maintenant quelques mots de ce que représente le fleuve au moment où ses eaux atteignent leur niveau maximum, c'est-à-dire pendant les crues.

Dans la zone tempérée, où nous vivons, les crues ont lieu au printemps par suite de la fonte des neiges, accumulées durant l'hiver. En pleine fonte des neiges, l'eau ruisselle de partout, les moindres fondrières, les combes, les ravins portent des cours d'eau trouble. Il est difficile de sauter par-dessus certains d'entre eux ou de les passer à gué à cause de leur profondeur et de la rapidité du courant. Les rivières et les fleuves où afflue toute l'eau des champs et des forêts se gonflent, la glace hivernale qui les couvrait se rompt, la débâcle commence et les rivières quittent leurs lits, inondant les plaines sur une étendue plus ou moins grande, suivant l'abondance de la neige et la rapidité de sa fonte. Si le printemps est froid, la fonte est lente et la crue moins forte, mais en revanche plus durable. Un printemps chaud fournit brusquement beaucoup d'eau.

Les eaux printanières sont toujours très troubles, très boueuses; tous les ruisselets qui descendent les pentes dévalent le terrain où ils passent et apportent dans les rivières beaucoup de limon et de sable. Les rivières et les fleuves gonflés accentuent leur travail d'érosion, car ils coulent plus vite, l'eau y est plus abondante et elle couvre les zones de la rive qu'elle ne pouvait atteindre pendant les basses eaux. Même les petites rivières se transforment en torrents

larges et profonds. Ces eaux troubles entraînent les arbustes et les arbres arrachés aux berges et toutes sortes de débris que l'eau emporte des champs, des potagers, des rues des villages et des villes. Et plus le fleuve est grand, plus le niveau des crues s'écarte du



Fig. 25. Marmites de géants dans le défilé de l'Énisséï, Saïan occidental.

niveau des eaux moyennes, le dépassant de 10 à 15 et même de 20 mètres.

Outre le printemps, les crues peuvent avoir lieu en été ou en automne, suivant la fréquence et la force des pluies. Ainsi, dans tout le bassin de la rivière Sélanga qui se jette dans le lac Baïkal et dans celui de l'Amour, en Extrême-Orient, les crues printanières sont faibles, car il y a peu de neige. La deuxième moitié de l'été, en revanche, est très pluvieuse et les crues d'été s'accompagnent

souvent d'inondations qui ont un effet funeste, car elles coïncident avec le temps de la fenaison et de la récolte; les prés sont inondés et les herbes se couvrent de fange et deviennent inutilisables, tandis que les herbes coupées sont emportées par les eaux. La moisson se trouve retardée ou bien le blé coupé est mouillé et germe.

Dans les pays où les hivers sont doux, presque sans gel, comme en Europe occidentale et méridionale, dans les Etats du Sud des U.S.A. et dans le Caucase, il pleut en hiver au lieu de neiger, et les crues ont lieu en cette saison et parfois aussi en automne. Sous les tropiques les hivers sont secs et ensoleillés, tandis que les étés sont des périodes de pluies torrentielles, c'est pourquoi les crues n'y ont lieu qu'à cette époque et durent longtemps.

Quelle que soit la saison des crues, l'eau, durant cette période, accentue fortement son travail d'érosion et de dépôt. Comme nous l'avons déjà mentionné, le Hoang-ho transporte par jour 400 fois plus de limon pendant la période de crue que pendant les basses eaux. Le Gange, en Inde, jette à la mer les quantités suivantes d'alluvions (en mètres cubes):

En 122 jours de pluie	170 000 000
En 5 mois d'hiver	6 000 000
En 3 mois de sécheresse	1 000 000

Par conséquent le Gange jette en 4 mois de pluies 24 fois plus d'alluvions que durant les huit mois restants de l'année.

Les quantités d'eau pendant les crues augmentent par rapport aux chiffres moyens de 2 à 3 fois dans les pays à climat régulier, et de 5 à 20 fois dans les pays où les hivers sont humides et riches en neige ou en pluies. Ainsi, par exemple, la Moskova a un volume d'eau 30 fois supérieur pendant les crues et parfois même jusqu'à 100 fois plus, comme pendant l'inondation de 1880.

Les torrents de boue. Outre les alluvions que le fleuve dépose régulièrement sous forme de limon, de sable, de gravier et de galets le long de son lit, sur les terres submersibles et sur les terrasses, nous trouvons des dépôts semblables laissés par des torrents passagers et temporaires. De tels torrents sont caractéristiques pour les déserts et, en général, pour les contrées à climat très sec, où les pluies sont rares mais brusques et torrentielles. Des averses de ce genre peuvent avoir lieu à titre exceptionnel dans les pays où les précipitations atmosphériques sont réparties régulièrement. Les énormes masses d'eau qui se trouvent brusquement déversées durant de telles pluies dévalent rapidement les pentes sans avoir

le temps de s'imbiber dans le sol, comme c'est le cas pendant les pluies faibles mais de longue durée. Ces averses produisent en un court laps de temps un énorme travail destructeur et font de gros dégâts dans les régions habitées.

Elles sont surtout funestes dans les régions montagneuses, car l'eau s'écoule rapidement et donne naissance à des torrents tumultueux qui se précipitent impétueusement vers le bas des montagnes. Un tel torrent entraîne les couches de terre végétale, creuse des crevasses profondes, transporte les galets et les graviers et même de gros blocs de rochers et laisse tout ce qu'il porte dans les plaines ou les larges vallées, où l'eau, se dispersant rapidement, perd sa force et abandonne tout ce matériau en couche épaisse qui ensevelit les routes, les jardins, les rues des villages. Après ces averses il faut déblayer les jardins, réparer les édifices et transporter des centaines de tonnes de terre.

On observe ces torrents impétueux et temporaires assez rarement dans les régions montagneuses de la Yougoslavie, au Caucase, en Crimée, en Arménie, en Turkménie, au Kazakhstan. Ils sont fréquents dans les déserts où les pluies, bien que rares, atteignent



Fig. 26. Déjection de matériaux fins dans les monts Still-water, Etat du Nevada, Etats-Unis.



Fig. 27. Affleurement de proluvions sur le bord de la Petite mer du Baïkal au-dessus du plan de faille de la chaîne Primorski, entre les rivières Sarma et Khourma.

une grande force et entraînent dans les vallées beaucoup de matériaux.

Ce qui les distingue des dépôts alluvionnaires apportés par les fleuves, c'est une répartition chaotique des diverses sortes de matériaux qui les composent. Des blocs énormes de rocher, de petites pierres, le sable, le limon — tout y est mélangé sans aucun ordre. Dans les alluvions fluviales nous pouvons voir que les couches de matériaux de différente grosseur se succèdent dans un ordre que l'on peut dire régulier, des couches de sable d'une certaine épaisseur se superposant aux couches de limon ou de gravier; le gravier, à son tour, est trié par ordre de grosseur croissante et cette stratification peut se répéter plusieurs fois dans la coupe d'un ravin ou d'une terrasse. Dans les montagnes seulement, où les pluies provoquent une crue rapide, les couches sont chaotiques et rappellent les dépôts dont il vient d'être question (fig. 26 et 27).

Je décris plus loin plusieurs cas de torrents de boue catastrophiques.

Les dépôts résultant du travail de l'eau courante portent le nom général de dépôts alluviaux ou alluvions. On particularise les dépôts formés par les torrents boueux par le nom de proluvions qui caractérisent les dépôts formés par les cours d'eaux temporaires débouchant des montagnes dans les vallées et déposant leur matériau sous forme de cônes aplatis au pied des montagnes, car dans la vallée le torrent se disperse rapidement et perd sa force. Des

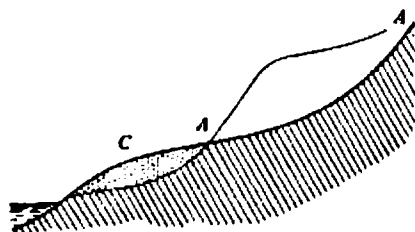


Fig. 28. Cône de déjection *C*
d'une vallée latérale *AA* dans
la vallée principale.

cônes semblables, mais plus aigus et de différentes grandeurs, peuvent être observés à l'embouchure des ravins et des cours d'eau qui descendent les pentes abruptes vers de larges vallées de montagnes. Dans ce cas le torrent qui, lorsque la déclivité était grande, avait la force de transporter des matières lourdes, la perd par suite du changement rapide de l'angle de chute et dépose rapidement les pierres et les galets en les accumulant de façon désordonnée. Dans les ravins qui s'étendent dans des terrains plus meubles ces dépôts sont constitués de sable ou de gravier. On appelle ces cônes en terme général cônes de déjection. Ce sont, somme toute, des deltas en miniature, qui ne se distinguent des véritables deltas fluviaux que par l'angle d'inclinaison plus prononcé et une distribution chaotique des matériaux (fig. 28).

CE QUE L'ON PEUT APPRENDRE AU BORD DE LA MER

Le ressac. La destruction de la côte. Gorge et terrasse. Plages et falaises. Pourquoi les galets se déplacent le long des côtes. Les courants. Formation des sédiments. Les strates. Les affleurements. Les estuaires, les lagunes, les limans. Les types de lacs.

Nous avons pris connaissance du travail de l'eau qui est perpétuellement en mouvement, coule en suivant les déclivités de la surface terrestre, sous forme de ruisseaux, rivières et fleuves et provoque sur son chemin des modifications de cette surface. En certains endroits elle détruit, érode les couches de l'écorce terrestre, en d'autres elle bâtit en déposant les produits de ce travail destructeur sous forme de galets, de sable, de limon, autrement dit en formant des couches nouvelles.

La masse de cette eau mobile, courante, n'est pas très importante à la surface de la terre. Les quantités d'eau emplissant les creux plus ou moins importants sous forme de lacs, mers et océans sont beaucoup plus grandes.

Mais cette eau que l'on appelle "stagnante", travaille également à la transformation de la surface de la Terre, parce qu'elle ne se trouve pas partout et toujours en état de repos, d'immobilité.

Des masses plus ou moins considérables de cette eau tranquille dans les lacs, les mers et les océans se déplacent continuellement en formant des courants, tandis que les mouvements de l'air, les vents se transmettent aux couches superficielles de tous les bassins d'eau et provoquent leur agitation. Les vagues, se heurtant aux côtes, les sapent, les détruisent en certains endroits et, en faisant des dépôts, font avancer les côtes, en d'autres.

Le ressac. Pour voir le travail des vagues il faut aller au bord de la mer ou d'un grand lac; dans les étangs ou les petits lacs un vent,

même fort, ne provoque que des vagues trop faibles dont le travail est peu visible. Suivons tout d'abord le mouvement des vagues. En approchant des côtes, les lames, relativement régulières, changent brusquement; les crêtes des vagues deviennent plus aiguës, pointent en avant, et la vague se retourne en bruissant et écumant. Cela s'explique par le fait que la mer est peu profonde à proximité de la côte et la crête de la vague devance sa partie inférieure dont le frottement contre le fond ralentit la course. De plus, l'eau de la vague précédente qui revient en suivant la pente du fond marin contribue à renverser en avant la vague qui la suit.

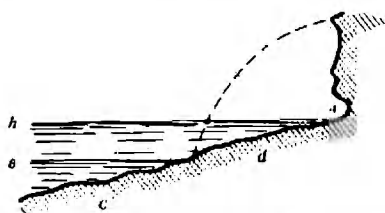


Fig. 29. Erosion au pied de la falaise.

a — excavation, *d* — terrasse marine (de ressac) au niveau de la marée haute *h*; *c* — idem au niveau de la marée basse *b*.

La vague développe une force assez grande lors de sa chute. Vous pouvez le vérifier quand vous vous baignez, en présentant le dos à la vague. Une grande lame peut faire perdre pied à un homme et le rejeter au rivage. Ce renversement de la vague à la côte est appelé le ressac. Suivant les mesures effectuées, la pression du ressac atteint de 3 000 à 30 000 kilogrammes par mètre carré. Le ressac

marin, par forte tempête, peut déplacer des roches d'un poids atteignant 100 tonnes et même les jeter, comme une balle, par-dessus un môle. Le ressac peut soulever des bateaux de faible tonnage — cent à deux cents tonnes — et les jeter à la rive. Lorsque le ressac se brise contre les rochers du rivage, l'eau peut rejaillir jusqu'à une hauteur de soixante mètres et plus. Les verres d'un phare en Ecosse sont parfois brisés par les pierres que jette le ressac, bien que la hauteur de ce phare soit de 80 mètres. Les vagues qui ne se renversent pas, mais s'écrasent de toute leur masse contre les rivages abrupts, lorsque la profondeur est grande, possèdent également une force énorme.

La destruction de la côte. En se brisant contre la côte, le ressac la détruit peu à peu. Il creuse au niveau de l'eau un creux horizontal, une excavation (*a*, fig. 29), dont les dimensions dépendent de la dureté de la roche qui forme la rive (fig. 30 et 31). Cette gorge se creuse de plus en plus profondément et la partie de la roche qui se trouve en porte à faux s'effondre, le temps aidant, ce qui pro-

voque un recul de la rive abrupte. Le ressac poursuit son travail et, peu à peu, un emplacement aplani par les vagues et en pente douce vers la mer se forme au pied du rivage; on l'appelle terrasse de ressac; elle s'agrandit constamment au détriment de la falaise (b, fig. 29).

Sur les bords des océans où se produisent les marées, c'est-à-dire où le niveau de l'eau change quatre fois en vingt-quatre heures, atteignant deux fois le maximum et deux fois le minimum, le ressac forme deux terrasses: l'une au niveau de la marée haute, l'autre au niveau de la marée basse (c, fig. 29), séparées par un petit escarpement. Cela s'explique par le fait que le ressac travaille à marée haute et basse à des niveaux différents, mais est plus fort au moment du flux que du reflux.

La terrasse de ressac demeure nette, aplanie par les vagues, si les roches qui forment le rivage sont assez tendres. Le ressac les brise alors en menus fragments emportés par l'eau. Si par contre le rivage est formé entièrement ou partiellement de roches dures, la terrasse de ressac est plus ou moins encombrée de leurs débris résultant de la destruction du rivage; ces débris, sous les coups des vagues, roulent et, se frottant les uns aux autres, s'arrondissent peu



Fig. 30. Excavation de ressac dans les couches horizontales de l'île Nicolas de la mer d'Aral.



Fig. 31. Excavation de ressac dans les couches fortement inclinées. Le rocher "La Trompe", cap Chaman, Baïkal.

à peu et deviennent des galets. Recouvrant sur une étendue plus ou moins large le pied de la falaise, ils forment des plages.

On voit parfois sur les terrasses des blocs isolés de différentes formes et dimensions, restes des roches formant la falaise qui sont encore soumis à l'action du ressac. Ils adoptent parfois des formes bizarres, ressemblant tantôt à des colonnes, tantôt à des tours ou des portes de diverses grandeurs (fig. 32).

Si le niveau de la mer ou du lac demeure constant assez longtemps, le rivage escarpé, reculant continuellement, échappe en fin de compte au ressac. Tout d'abord il est soumis à l'action de toutes les tempêtes, puis seules les vagues des tempêtes les plus fortes peuvent l'atteindre, plus tard seulement celles des tempêtes d'une force exceptionnelle et il devient enfin inaccessible. Alors son recul, qui se ralentissait de plus en plus, cessera, et la falaise s'adoucirà peu à peu grâce aux éboulements et se couvrira de végétation. Mais les pierres et les galets de sa terrasse, qui demeurent dans le champ d'action du ressac continueront à être roulés, s'useront et deviendront peu à peu de plus en plus minces. Ainsi se forment les plages de galets au pied des côtes escarpées qui ont reculé, et que l'on peut observer en maints endroits de la Crimée et du Caucase.

Mais le niveau de la mer ne reste pas toujours le même. Des observations exactes ont montré qu'en certains endroits le continent s'élève lentement et, par suite, la mer semble reculer, son niveau baisse. En d'autres endroits, le continent s'abaisse, la mer semble avancer, son niveau monte. Lorsque la mer recule, le rivage abrupt échappera, de toute évidence, plus rapidement à l'action du ressac; mais, quand la mer avance, il ne peut sortir de la zone d'action du ressac et la mer envahit des bandes nouvelles de terre ferme en les transformant toujours en terrasses.

Ainsi, lors de l'immersion du continent, de larges surfaces aplanies par l'action de la mer qui avance, se forment. On les appelle surfaces d'"abrasion marine", autrement dit de rasage, de sectionnement par la mer.

Les côtes plates. Passons maintenant aux côtes basses et plates et voyons le travail qu'y effectue le ressac. Quand la crête de la vague se renverse à quelques pas du rivage, les masses d'eau se précipitent vers le haut de la pente inclinée en portant une multitude de grains de sable et de petits galets, et même, quand le ressac est fort, des blocs de roche. Plus l'on s'élève en suivant la pente, plus la couche d'eau montante est mince et, enfin, près de la limite qu'atteint la vague, on peut voir que toute l'eau s'est infiltrée dans



Fig. 32. Falaises abruptes presque sans plage. Côte Sud de la Crimée.



Fig. 33. Côte plate de l'île de Ceylan à marée haute.

le talus et ne retourne pas à la mer comme le fait le reste de l'eau (fig. 33). C'est là, à la limite supérieure de l'eau montante, qu'a lieu le dépôt du matériau que la vague apporte—grains de sables, galets—alors qu'au-dessous de cette limite l'eau descendante reporte ces matières à la mer. Ainsi s'accroît peu à peu la côte basse où l'on peut voir par temps calme plusieurs bourrelets. Le premier de ces bourrelets est plat, formé de sable et de galets fins et est le résultat du dernier flux de peu d'importance. Le suivant, un peu plus élevé et formé de galets plus gros, date de la dernière forte tempête. Celui qui est le plus haut et le plus éloigné de la limite de l'eau est l'effet d'une tempête particulièrement violente qui a eu lieu il y a peut-être six mois ou plus, et est formé des galets les plus gros; les vagues montaient très loin sur le rivage et y jetaient même jusqu'à des blocs de rochers. Ces bourrelets qui courent le long de la côte, sont appelés cordons côtiers (fig. 34). Ceux qui sont le plus rapprochés de la limite des eaux changent souvent de place suivant la force du vent et du ressac et sont de formation contemporaine. Ceux qui se trouvent si loin de la mer que le ressac ne les atteint jamais, nous montrent que la mer a reculé sur cette rive, ce qui ne peut s'expliquer que par un soulèvement de la terre ferme, car la masse totale

de l'eau de la mer ne varie pas aussi rapidement. C'est tout différent si nous trouvons un tel cordon sur le bord d'un lac: c'est le signe que la quantité d'eau dans le lac diminue, autrement dit, que le lac est en voie de se dessécher (fig. 34).

Lorsqu'un continent s'élève, on peut observer des cordons côtiers loin de la côte et bien au-dessus du niveau de l'eau, mais aussi des terrasses de ressac, des excavations, des rochers rongés par l'eau, des amas de pierres à leur pied, disposés à différente hauteur. Sur les bords d'un lac, ce sont des preuves de son assèchement.

En d'autres cas, lorsque le soulèvement du continent est assez rapide, l'on peut voir des vallées suspendues, si l'on peut dire, c'est-à-dire des vallées suivies par des cours d'eau ou des ravins dont les embouchures sont disposées non pas au niveau de la côte, mais à une certaine hauteur au-dessus d'elle, car les vallées se creusaient plus lentement que le continent ne se soulevait (ou que le lac ne se desséchait). L'eau d'une telle vallée tombe en cascade ou coule en suivant un plan très incliné jusqu'à la plage. De telles "vallées suspendues" peuvent être observées sur la côte occidentale de l'île Sakhaline qui a subi, il y a peu de temps, un soulèvement rapide.



Fig. 34. Cordons côtiers du lac Thurston en voie d'assèchement, Californie. Le lac provient de la formation d'un barrage de lave volcanique.

Nous ne pouvons voir des pierres rondes et des galets sur le bord de la mer ou des lacs et dans les cordons côtiers que dans les cas où la côte plate est bordée à une certaine distance par une falaise. Si cette dernière est très éloignée, la côte plate sera formée exclusivement de sable fin ou même limoneux, visqueux. Ainsi, les côtes septentrionales de la mer Caspienne, une partie de la côte de Crimée (près d'Eupatoria et du Sivache), les bords de nombreux lacs de la steppe précaspienne et de la Sibérie. Ces rives plates, surtout à proximité de l'embouchure des grands fleuves, sont envahies par les roseaux sur de grandes étendues;

ceux-ci, atténuant l'effet des vagues même assez fortes, contribuent à la progression de la zone riveraine.

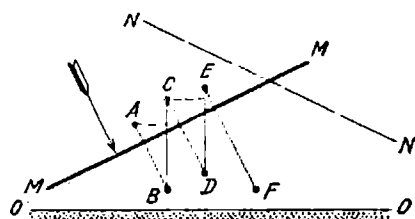


Fig. 35. Mouvement des galets le long de la côte. La flèche indique la direction du vent.

MM — crête d'une vague oblique,
OO — limite de l'eau montante,
NN — vague oblique de direction différente. *ABCDEF* — chemin suivi par les galets.

Le mouvement des galets le long de la côte. Mais si le bord escarpé n'est pas trop éloigné, les galets qui se sont formés à partir des roches qui le composent peuvent constituer des cordons côtiers et des plages jusqu'à plusieurs kilomètres des affleurements de ces roches. Comment les galets ont-ils pu se déplacer si

loin, quelle est la force qui les a transportés jusque-là? Les vagues de ressac, comme nous le savons, ne roulent les galets que vers le haut ou vers le bas, sans les déplacer latéralement, semble-t-il.

Il n'en est pas ainsi en réalité. Nous pouvons nous en persuader en observant le mouvement des galets pendant le ressac. Si la crête des lames est absolument parallèle à la ligne de la côte, les galets seront roulés de bas en haut et vice versa sur la plage immergée. Mais si la vague est oblique, autrement dit si elle attaque la plage sous un certain angle, les galets se déplacent le long de la côte en suivant la ligne en zigzag indiquée sur la figure 35.

Suivons le chemin d'un galet quelconque, en en choisissant un qui se distingue des autres par sa couleur, blanche ou rouge, par exemple. La vague oblique *MM*, soulevant le galet au point *A*, l'entraîne dans son mouvement jusqu'au point *B*; dans son mouvement de retrait le galet ne reviendra plus au point *A* mais, suivant

avec l'eau la ligne de déclivité maximum, se trouvera au point *C*. La vague suivante la jettera au point *D* et, en se retirant avec elle, le galet atteindra le point *E*, etc., en progressant peu à peu le long de la côte, et chaque fois d'une distance égale à la perpendiculaire abaissée de son point de retrait le plus bas sur la droite suivant laquelle il se retire, autrement dit de *A* sur *BC*, de *C* sur *ED*, etc. Ce mouvement est, certes, souvent interrompu. Notre galet peut être jeté par une vague particulièrement forte au point *F* où il demeurera jusqu'à ce qu'une vague encore plus forte ne vienne l'enlever, ou bien il tombera dans un creux de la plage et y demeurera pour longtemps, et ainsi de suite.

Le lecteur peut suivre le mouvement des galets sur la côte méridionale de la Crimée ou sur le littoral caucasien de la mer Noire. Lorsque les vagues obliques sont suffisamment fortes, il faut choisir un galet assez voyant et suivre ses mouvements alternatifs dans le courant pendant un certain temps, puis mesurer le chemin qu'il a parcouru le long de la côte à partir du point où l'observation a commencé.

La vague oblique de direction contraire déplacera le galet en sens inverse (*NN*, fig. 35). Les vagues qui, en haute mer, suivent une ligne perpendiculaire à la côte deviennent également obliques quand elles approchent de celle-ci (fig. 36). En somme, le déplacement du galet le long de la côte en telle ou telle direction dépendra en fin de compte de la direction dominante des vents qui soufflent obliquement par rapport à la côte. Ainsi, sur la côte méridionale de la Crimée, qui d'Aloupka à Féodosia est orientée du sud-ouest au nord-est, comme le montrent les données météorologiques, les galets doivent se déplacer de Féodosia vers Aloupka de préférence. C'est pourquoi il n'est pas étonnant que nous trouvions à Alouchta des galets provenant des rochers côtiers de Kara-Dagh et de Soudak, et à Ialta et Aloupka ils proviennent de l'Aïou-Dagh et de Gourzouf, en plus, naturellement, des roches locales (fig. 37).

De grandes quantités de pierres se concentrent surtout au pied des promontoires s'avancant loin dans la mer, ainsi que dans les baies d'où le galet, une fois qu'il y est apporté par les vagues, ne

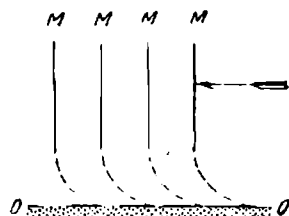


Fig. 36. Mouvement des galets le long de la côte. La flèche indique la direction du vent.

MM — crête de la vague;
OO — limite de l'eau.

peut plus sortir. Ce sont ces mêmes "migrations" de matériaux qui expliquent la formation des langues de terre qui coupent peu à peu les sorties des baies (barres) et transforment ces dernières en lagunes et, en dernier lieu, en lacs sans communication directe avec la mer (fig. 38).

Les courants. Outre les vagues, qui sont mues par des vents instables, il existe dans les mers, les océans et les lacs assez importants des courants, c'est-à-dire des déplacements de masses

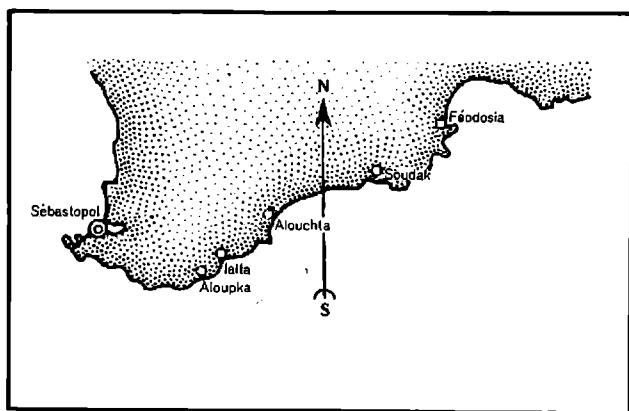


Fig. 37. Carte du Côte Sud de la Crimée.

d'eau plus ou moins considérables dans telle ou telle direction. Ces courants se forment aux embouchures des fleuves qui déversent dans les mers une eau douce et tiède, c'est-à-dire plus légère que l'eau de mer. Cette eau coule dans une certaine direction au-dessus de l'eau de mer, se mélangeant peu à peu avec cette dernière et perdant de sa vitesse.

Les courants les plus importants dépendent des différences de températures qui existent dans les différentes parties de l'océan, et des vents dominants. Ainsi la mer des Antilles, fortement chauffée par le soleil, donne naissance à un puissant courant chaud, le Gulf-Stream, qui se dirige, en traversant l'océan Atlantique, vers les rives de l'Europe et rend son climat plus doux.

Une branche de ce courant passe au nord de la Scandinavie et atteint même la mer de Barentz.

L'eau froide quitte l'océan Glacial Arctique en suivant principalement la côte est du Groenland et forme un puissant courant

froid qui atteint le rivage oriental de l'Amérique du Nord d'où un climat plus froid au Canada et aux Etats-Unis. Des courants moins importants issus de ce même océan passent par la mer de Baffin à l'ouest du Groenland et par le détroit de Bering entre l'Asie et l'Amérique.

D'autres courants à l'examen desquels nous ne pouvons nous attarder sont également connus. Ils passent trop loin de la terre ferme pour pouvoir exercer sur elle une action destructrice, mais transportent néanmoins des matériaux différents. Les courants froids portent des icebergs et des champs de glace, sur lesquels on peut trouver des blocs erratiques et des galets issus des glaciers du Spitzberg et d'autres îles; lorsque les glaces fondent, ces matériaux tombent au fond de l'océan. Le Gulf-Stream porte des débris d'algues et du plancton, c'est-à-dire différentes variétés d'animaux et de végétaux des mers chaudes vers les mers froides où ils servent de nourriture aux poissons. Les faibles courants côtiers déplacent le long des rivages les matériaux fins, grains de sable et limon, apportés par les fleuves ou résultant du ressac.

Formation des roches sédimentaires. Qu'advient-il du matériau que les fleuves jettent dans les lacs, les mers et les océans et qui est produit par le ressac sur le bord de la mer?

Dans l'eau des mers et des lacs, la vase apportée avec l'eau des fleuves se dépose peu à peu, les particules plus grandes les premières et plus près des embouchures des fleuves ou du rivage, les plus fines et les plus légères plus tard et plus loin des côtes. Les particules les plus fines ne se déposent dans les grands lacs que vers les parties centrales, et dans les mers elles sont emportées par les courants à des centaines de kilomètres des côtes. Partout, elles se déposent au fond, une à une, jour après jour, durant des années, des siècles, des millénaires.

Ainsi, couche par couche, ce dépôt s'accroît au fond des lacs et des mers; plus près des rives les particules les plus grosses, des grains de sable, constituent des couches de sable, plus loin les parti-

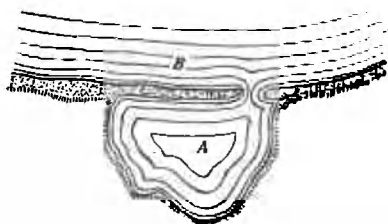


Fig. 38. Formation d'une lagune.

A — golfe, B — barre, transformant le golfe en lagune.

cules plus fines forment diverses argiles: les argiles sablonneuses plus près de la région de dépôt des sables, les argiles pures plus loin. Les sables et les argiles contiennent souvent des particules de calcaires, de minuscules éclats de mica. Les dépôts récents sont encore tout à fait fluides, fortement dilués d'eau. Vous pouvez vous en rendre compte en vous baignant: vos pieds enfoncent plus ou moins profondément dans le fond.

Mais peu à peu, grâce à une sédimentation incessante, ces couches deviennent plus fermes, l'eau s'en élimine, les particules s'agglomèrent, et, à une profondeur de quelques mètres au-dessous du niveau du fond de la pièce d'eau, le dépôt n'est plus semi-liquide comme le sable ou le limon. Il est devenu assez compact, quoique tendre encore. Avec le temps, à de grandes profondeurs, ce dépôt devient plus dur. Sous la pression des couches supérieures et avec l'aide de l'eau qui les pénètre et contient en solution diverses combinaisons (calcaires, silice, fer), les différentes particules du dépôt se soudent les unes aux autres. C'est ainsi qu'apparaissent des roches déjà plus ou moins dures — les grès purs, argileux ou calcaires, formés à partir du sable, les argiles schisteuses et les schistes argileux, produits de l'argile; si, en même temps que les argiles, un limon calcaire se dépose, nous obtiendrions la marne, et si les déchets calcaires prédominent, nous aurons du calcaire argileux.

Mais les fonds des mers et des lacs ne sont pas privés de vie: des algues, des éponges, des lys de mer et, dans les mers chaudes, des coraux; divers mollusques y vivent, formant parfois des colonies entières qui occupent des surfaces plus ou moins étendues; des vers, des étoiles de mer, des oursins y rampent. Les restes de ces végétaux, les coquilles, les carapaces, les enveloppes dures des animaux, sont ensevelis dans les sédiments isolément ou par couches entières apportant une certaine diversité dans la composition de ces roches en formation. Dans les mers chaudes les coraux vivent en colonies énormes et constituent ce qu'on appelle des récifs coralliens. Le travail des vagues détruit les parties mortes des récifs, transforme la matière des polypes en sable calcaire qui se dépose au fond. Et voilà que dans les schistes argileux, dans les marnes et les calcaires se formant à partir des alluvions, nous trouvons des coraux isolés, des coquilles, des étoiles de mer, des oursins ou même des couches entières de résidus de ces animaux (fig. 39).

Certaines algues extraient de l'eau de mer de la chaux qui s'accumule dans leurs tiges. Les restes de ces algues sont à la source

de la formation de couches entières d'un calcaire particulier. Dans les mers vivent également des végétaux minuscules nageant librement, nommés diatomées dont l'enveloppe est constituée de silice qu'ils extraient de l'eau. Il y a également dans les mers des animalcules: les radiolaires dont les squelettes sont faits de silice, et

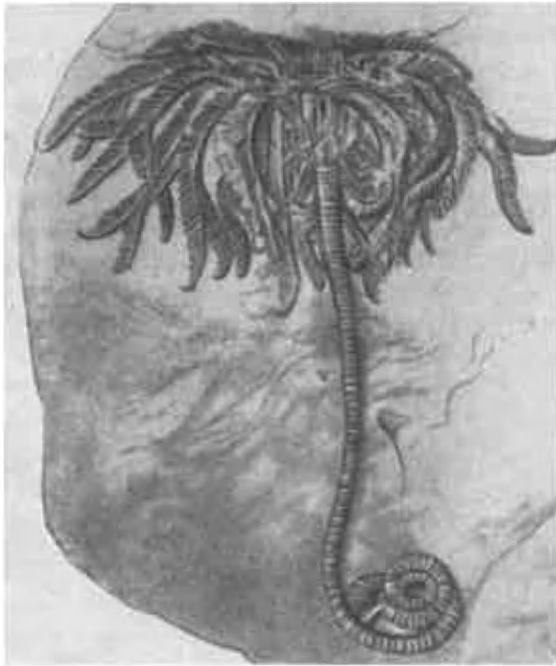


Fig. 39. Lys de mer *Acanthocrinus rex*. Rare échantillon entier. Trouvé dans les schistes dévoniens des monts Hunsruck.

les foraminifères dont les carapaces sont calcaires. Ces végétaux et ces animalcules y vivent en quantités immenses, en formant avec les diverses infusoires, les méduses, les crustacés et les mollusques transparents, ainsi que les larves des différents animaux marins, ce qu'on appelle le plancton — une association d'organismes vivants flottant dans l'eau et servant de nourriture à de nombreux poissons et autres animaux marins. Les squelettes et les carapaces de ces êtres, se déposant après leur mort au fond des mers, se mélangent aux matériaux non-organiques, alors que dans les régions plus pro-

fondes où ceux-ci ne parviennent pas, étant donné l'éloignement des côtes, les squelettes et les carapaces de ces animalcules forment un dépôt particulier, essentiellement siliceux (vases à diatomées et vases à radiolaires) ou calcaire (foraminifères) qui se transforme, le temps aidant, en roches dures, que l'on appelle randanite (diatomite, terre d'infusoires), en schistes siliceux et en craie blanche. Cette dernière surtout, bien connue des jeunes lecteurs, est entièrement constituée de carapaces de foraminifères avec une

adjonction de squelettes de radiolaires et de diatomées, comme le montre le microscope (fig. 40).

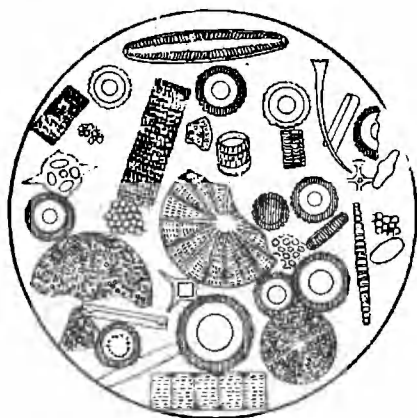


Fig. 40. Flore et faune microscopiques des roches sédimentaires (sous le microscope).

Toutes les roches énumérées qui se sont formées par dépôts, que leur origine soit organique ou non, sont appelées sédimentaires. Les grès, les sables, les galets et les conglomérats (ces derniers constitués de galets et de graviers et enrobés, en nombre plus ou moins grand, dans le grès, le calcaire ou l'argile, c'est-à-dire dans un matériau plus fin que l'on appelle ciment, car il lie les parties plus gros-

sières les unes aux autres), ainsi que les différents limons, argiles et schistes qu'ils ont formés, sont également appelés roches détritiques, parce qu'elles sont composées de détritiques provenant de la désagrégation de roches plus anciennes par l'eau courante ou stagnante.

Parmi les roches sédimentaires citons les couches de gypse — sulfate de calcium et de sel gemme — chlorure de sodium, ainsi que d'autres sels qui retombent des solutions et se déposent au fond des golfes marins et des lagunes, ainsi que dans les lacs salins quand l'eau en contient tant que l'évaporation donne lieu à leur précipitation. Ces sels alternent d'ordinaire avec des couches d'autres sels ou de sable, d'argile, de limon.

Les strates et la stratification. Le dépôt de matériaux dans l'eau n'a pas lieu de façon ininterrompue; d'autre part sa qualité ou sa grosseur varie. Pendant les crues, quand le courant est plus rapide,

les fleuves jettent dans les mers et les lacs un matériau plus grossier —sable, gravier; les torrents montagneux charrient même des galets et des grosses pierres. Pendant les basses eaux l'apport de matériau cesse, ou bien le matériau apporté est fin. C'est pourquoi les roches sédimentaires sont étagées par couches, tantôt minces, tantôt épaisses, se distinguant les unes des autres par la qualité ou la couleur. Chaque couche est le résultat du dépôt ininterrompu d'un même matériau pendant un certain laps de temps et est séparée des couches supérieure et inférieure par une surface unie correspondant à l'intervalle entre la formation des sédiments que l'on appelle plan de stratification.

Dans les coupes de terrains formés de roches sédimentaires ces couches sont nettement visibles (fig. 41). Elles se superposent comme des feuilles de carton épais ou des planches empilées. Parfois toute la coupe est formée de couches minces, d'autres fois elles sont toutes épaisses; il arrive aussi que les unes et les autres alternent. Les couches épaisses sont également appelées strates. La distance minimum entre les plans de stratification qui délimitent la couche est appelée puissance (p , fig. 42).

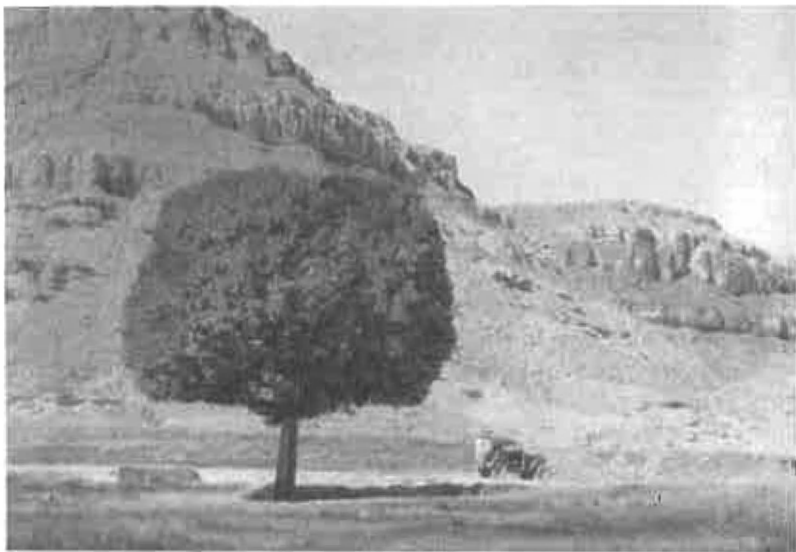


Fig. 41. Affleurements de calcaires tertiaires dans la Ferghana nord-est.

Certaines couches ont une épaisseur égale sur une grande étendue, alors que pour d'autres ces épaisseurs varient, devenant tantôt très petites, tantôt plus grandes; les couches forment des renflements (*a*, fig. 42) et des étranglements (*b*, fig. 42). Certaines couches s'amincissent rapidement dans les deux sens pour disparaître enfin complètement, les plans de stratification supérieur et inférieur se confondent. Une telle couche est appelée lentille, et sa disparition — lacune stratigraphique (*c*, fig. 42). La couche

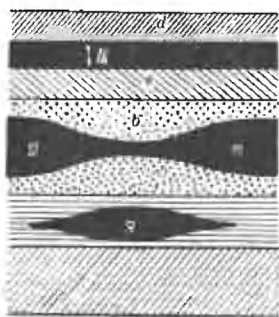


Fig. 42. Coupe d'une couche de roches sédimentaires.

a — renflements et *b* — étranglements, *c* — lentille, *d* — voûte de la couche, *e* — mur de la couche, *p* — puissance de la couche.

qui se trouve immédiatement au-dessus de la couche qui nous intéresse est appelée toit, celle qui est immédiatement au-dessous — mur (*d*, *e*, fig. 42). Le point de la berge, de la vallée où les roches apparaissent sur une étendue plus ou moins grande de dessous le terrain meuble est appelé affleurement (fig. 43 et 44). Les falaises, les rochers et souvent les pentes abruptes des montagnes sont des affleurements sur toute ou presque toute leur étendue.

Les fossiles. Comme nous le savons déjà, on peut souvent remarquer dans les couches de roches sédimentaires des débris d'animaux ou de végétaux qui ont participé à la formation de ces roches ou, par l'effet du hasard, se sont trouvés engagés dans le limon ou le sable qui se déposait au fond du bassin. Ces restes sont les parties dures des organismes — coquilles des mollusques, carapaces des crustacés et des tortues, ossements des vertébrés, tiges et branches des arbres. On y trouve en outre des empreintes de leurs parties molles — feuilles, rameaux, ailes d'insectes, corps de méduses. Tous ces restes sont appelés fossiles et ont une grande importance pour la détermination de l'âge des roches qui constituent l'affleurement et des conditions qui ont présidé à leur formation, à savoir si elles se sont déposées au fond des mers, des lacs ou sur la terre ferme. Nous en reparlerons en détail au chapitre X. Nous nous contenterons ici de retenir que l'on trouve souvent de ces fossiles dans les affleurements de roches sédimentaires (fig. 39 et 40).

Les estuaires, les lagunes, les limans. Nous avons déjà vu dans le premier chapitre que les rivières et les fleuves qui se jettent dans



Fig. 43. Stratification discordante des couches de calcaire jurassique supérieur sur des couches de schiste du jurassique moyen, Rivière Ouroukh.

les mers ou les lacs forment des deltas à l'aide des matériaux qu'ils charrient. Mais les deltas émergés ne peuvent se former que si la terre ferme ne s'abaisse pas ou s'est abaissée depuis longtemps, faute de quoi le delta restera submergé, invisible. Dans les endroits où le continent ne s'est abaissé qu'à une époque récente, l'embou-



Fig. 44. Affleurement de grès tertiaires et de schistes argileux près de Borjomi, Caucase.

chure du fleuve a la forme d'un entonnoir étroit qu'on appelle estuaire. Jetez un coup d'œil sur la carte de l'U.R.S.S. et vous verrez de telles embouchures sur l'Obi, le Tase et l'Iénisséi en Sibérie occidentale!

Les fleuves qui se jettent dans la mer Noire en descendant du Nord — le Dniepr, le Dnestr, le Boug et plusieurs petits fleuves, semblent avoir des embouchures analogues. Mais ce ne sont pas des estuaires, ce sont des limans, qui se différencient des estuaires en ce qu'ils sont séparés de la mer par une langue de terre, car après

l'abaissement de la terre ferme qui a provoqué la formation de l'embouchure en entonnoir, un soulèvement a déjà eu lieu; les fleuves, cependant, n'ont pas encore eu le temps de construire leurs deltas et seule l'action du ressac a pu élever une barre à la sortie du golfe qu'est devenu l'entonnoir de l'estuaire.

Les lagunes déjà mentionnées plus haut sont des golfes marins, grands ou petits, séparés de la haute mer par une langue de terre qu'on appelle aussi flèche ou barre. Cette flèche peut être continue et isoler complètement l'ancien golfe ou comprendre un goulet par lequel les eaux de la lagune communiquent avec la mer. Le Kara-Bogaz-Gol, dans l'Est de la Caspienne, est une énorme lagune. L'eau salée pénétrant par le goulet compense peu à peu la baisse de niveau du Kara-Bogaz-Gol provoquée par l'évaporation. C'est comme un énorme chaudron où l'eau de la Caspienne s'évapore et où se forme une solution concentrée qui permet au sel de se déposer. Le Sivach ou mer Pourrie, aux confins de la Crimée, est un marais salant, réseau de lagunes où la saumure se concentre et où se dépose le sel. Mais il y a aussi des lagunes où le dépôt du sel n'a pas lieu et où l'eau s'écoule vers la mer. Ce sont celles où se jette un fleuve assez important. Nous trouvons de telles lagunes sur la côte méridionale de la mer Baltique, entre Gdansk et Klaipeda; ce sont le golfe de la Vistule et le Kurisches Haff; le premier reçoit un des bras de la Vistule et le fleuve Prégola, le second — le Niémen (fig. 45).

Les limans peuvent également se transformer en lacs salants et déposer du sel, comme par exemple les limans Tiligoulski, Khadjibéiski, Kouïalnitski près d'Odessa, à l'embouchure de petites rivières qui se dessèchent en été. Une boue salée qui s'y dépose est utilisée pour le traitement de diverses maladies.

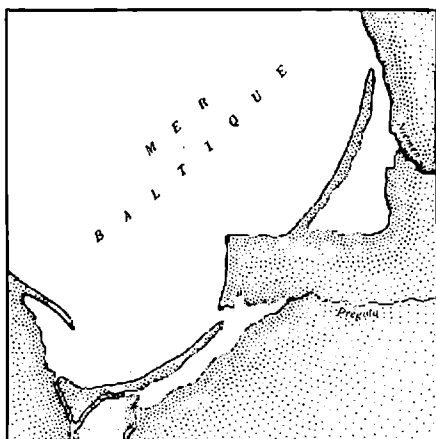


Fig. 45. Lagunes du golfe de la Vistule et du Kurisches Haff sur le bord de la Baltique entre Klaipeda et Gdansk.



Fig. 46. Barrage d'éboulement ayant provoqué la formation du lac Sary-Tchilek dans le Tian-Chan central.



Fig. 47. Lac des Quatre Cantons, Suisse. Sa fosse est creusée par un glacier.

Les lacs. Outre les limans et les lagunes qui sont des lacs étroitement liés avec la mer, on trouve sur la Terre beaucoup de lacs de dimensions extrêmement variées et d'origines diverses. On distingue deux types de lacs : les lacs de barrage et les lacs d'effondrement.

Les premiers se sont formés grâce à l'accumulation de roches barrant les vallées et y retenant l'eau. Les limans et les lagunes



Fig. 48. Lagune d'eau adoucie, envahie par la végétation, dans le Nord de l'Allemagne. Au premier plan, des nénuphars blancs; au second plan, des nénuphars jaunes; plus loin, des roseaux.

sont des lacs de ce type, car les langues de terre qui les séparent de la mer sont des barrages formés par le ressac. Les barrages peuvent également provenir d'un éboulis ou d'un glissement de terrain, de la moraine d'un glacier, d'une coulée de lave. Les bras morts des fleuves sont également des lacs de barrage qui résultent du travail du cours d'eau. Les lacs de barrage sont généralement de dimensions réduites, à quelques exceptions près (fig. 46).

Les lacs d'effondrement emplissent divers creux de la surface terrestre. Ces cavités, en général de faibles dimensions, sont dues à l'action des glaciers ou de l'eau des vallées, aux effondrements

ou aux affaissements des couches superficielles par suite de la dissolution de certaines roches (sels, gypse), au travail des eaux souterraines (voir chapitre III). Ces lacs, assez petits généralement, sont nombreux chez nous dans la région de Kirov et vers la source de la Volga. Les cratères des volcans éteints, qui sont des creux fermés de tous côtés, deviennent souvent des lacs. Les lacs les plus importants de ce type résultent des abaissements de parties considérables de l'écorce terrestre lors de la formation des chaînes montagneuses. Tels sont par exemple le lac Issyk-Koul au Kazakhstan, le Baïkal en Sibérie, le Khoubougoul-Dalaï (Kossogol) en Mongolie, le Tanganyika et plusieurs autres en Afrique, le lac Mort ou mer Morte en Palestine.

Parmi les lacs de l'U.R.S.S. certains sont des lagunes et des limans contemporains, d'autres comme l'Elton et le Baskountchak, — des lagunes anciennes; il y a également des lacs formés par suite d'effondrements, des lacs morainiques (dans l'Altai, le Tian-Chan, les monts Saïan), des lacs glaciaires (le lac Téletskoïé dans l'Altai), ceux des bras morts, des lacs volcaniques (dans le Kamtchatka).

Une science spéciale s'occupe de l'étude approfondie des lacs — c'est la limnologie.

III

LE TRAVAIL DE L'EAU SOUTERRAINE

Les eaux souterraines. Les sources. Les puits ordinaires et artésiens. Les kiarizes. Les sources minérales. Le pouvoir dissolvant de l'eau. Les entonnoirs, les glaciers encaissés. Paysage de karst. Disparition et apparition des cours d'eau. Formation des grottes. Les habitants des cavernes. Les grottes glaciaires. Les dépôts des eaux souterraines. Les éboulements et glissements de terrain.

Toute l'eau des pluies et des neiges tombées à la surface de la terre n'effectue pas de travail d'érosion visible. Après une pluie fine et de courte durée nous ne voyons ni flaques d'eau ni ruisselets dans les ornières ou dans les combes, si ce n'est dans les villes où l'asphalte et les pavés ne permettent pas à l'eau de s'infiltrer dans le sol. Mais même pendant les fortes pluies l'eau tout entière ne s'écoule pas en surface; une partie s'imbibe dans le sol, en quantité d'autant plus grande que le terrain est plus meuble et à pente moins prononcée, ce qui favorise l'écoulement. Les labours absorbent beaucoup plus d'eau que la terre battue des chemins, les terrains sablonneux bien plus que les terres argileuses. Le sable laisse toujours passer l'eau, la glaise s'en sature rapidement et cesse de l'absorber, elle devient imperméable.

On appelle l'eau infiltrée dans le sous-sol eau souterraine. Dans les terrains perméables l'eau, pénétrant peu à peu entre les parcelles du sol, descend de plus en plus profondément jusqu'à ce qu'elle rencontre une couche d'argile ou de roches non fissurées, à la surface de laquelle elle s'arrête et s'accumule. Les roches saturées d'eau sont appelées niveaux aquifères. Ces niveaux sont disposés à différentes profondeurs: d'un demi-mètre dans

certaines vallées jusqu'à des dizaines et même des centaines de mètres. Dans les marécages, où la couche imperméable est très proche de la surface, l'eau stagne entre les mottes de terre; le niveau aquifère se trouve ici à la surface même du sol.

L'eau ne s'infiltre pas seulement à partir de la surface. Une partie de l'eau courante des rivières et des fleuves pénètre également dans le sous-sol par le fond et les bords du lit et s'élève même légèrement au-dessus du niveau de l'eau grâce à la capillarité, provoquée par la tension superficielle de la couche liquide qui s'infiltre sans humecter les particules de terrain.

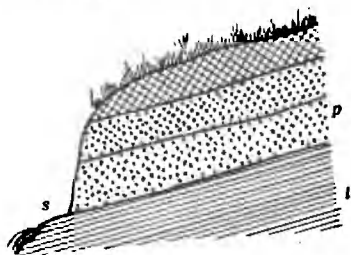


Fig. 49. Source de couche.

p — couches perméables, *i* — couches imperméables, *s* — source.

Le phénomène de capillarité est facile à observer. Trempez dans l'eau un morceau de sucre ou du papier buvard; vous verrez que très vite le morceau de sucre sera entièrement imprégné d'eau et le buvard jusqu'à une certaine hauteur seulement. L'eau humectant les particules de sucre et de

papier monte en suivant les interstices extrêmement fins qui les séparent. C'est pourquoi dans le fond des vallées de certains fleuves, on trouve parfois de l'eau souterraine à un niveau supérieur à celui de l'eau du fleuve.

Les sources et les puits. Si la couche imperméable sur laquelle s'est formée le niveau aquifère est inclinée dans une direction quelconque, l'eau souterraine se déplace lentement dans le sens de la pente. Imaginons que cette couche affleure au bord d'un ravin (fig. 49). L'eau, en la suivant, doit alors atteindre la surface. Une telle réapparition de l'eau souterraine est appelée source. Elle sera faible ou abondante, en fonction de la surface de la couche aquifère et de sa richesse en eau.

Mais l'eau souterraine peut être obtenue en plaine également si nous perçons le sol jusqu'à la couche aquifère. On creuse à cet effet des puits jusqu'au niveau aquifère. La couche imperméable doit rester intacte; si elle est détruite, l'eau descendra dans les couches perméables sous-jacentes et le puits sera vide. On affermit les parois du puits par de la maçonnerie, des charpentes ou des claies, pour éviter les éboulements. L'eau venant de la couche aquifère s'infiltre de tous côtés et se concentre dans le puits.

L'abondance de l'eau dans le puits dépend de l'épaisseur de la couche aquifère et de sa richesse en eau. Certains puits s'épuisent très vite et il faut alors attendre longtemps que l'eau s'accumule de nouveau; cela signifie que la nappe aquifère est pauvre en eau.

Les niveaux aquifères sont souvent superposés; sous la couche imperméable supérieure on trouve une nouvelle couche perméable que l'eau suit jusqu'à la couche imperméable suivante, etc. C'est pourquoi si le niveau aquifère supérieur est pauvre en eau on peut creuser jusqu'au niveau suivant. Il est préférable de se pro-

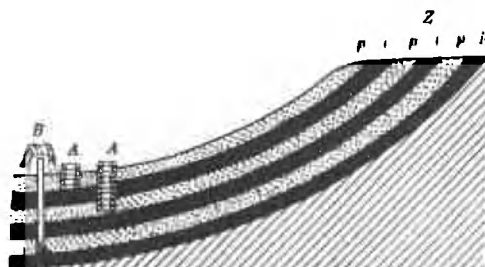


Fig. 50. Puits de différente profondeur.

A — puits ordinaires, *B* — puits artésien à jet; *Z* — zone d'alimentation, *p* — couches perméables, *i* — couches imperméables.

curer l'eau des couches les plus profondes non pas à l'aide de puits ordinaires mais de puits dits artésiens, qui sont des trous cylindriques percés dans le sol et munis de tubes de fonte (fig. 50). On y descend le tuyau d'une pompe à main à l'aide de laquelle on obtient l'eau.

Dans certains puits artésiens l'eau monte d'elle-même en suivant le tube jusqu'à une certaine hauteur et jaillit même parfois au-dessus du sol. Cela arrive au cas où le terrain a la forme d'une cuvette et le niveau aquifère qu'atteint le puits débouche sur une des hauteurs environnantes où il reçoit l'eau des pluies et des neiges. La différence de niveau entre le bassin d'alimentation en eau et l'emplacement du puits crée une pression suffisante pour que l'eau monte dans le tube et parfois même s'en échappe (fig. 50).

Un procédé très original de l'utilisation de l'eau souterraine pour l'irrigation des champs est celui des *kiarizes* en Azerbaïdjan, en Asie centrale et en Iran. Le climat y est très sec, les

pluies rares, les neiges exceptionnelles. L'eau des rivières et des fleuves qui descendent des montagnes tarit très vite en s'infiltrant entre les galets et les sables constituant le pied des montagnes. Alors, pour obtenir de l'eau, les cultivateurs creusent une galerie k (fig. 51), qui s'amorce à même les labours et pénètre de plus en plus profondément dans les roches du pied de la montagne en ne suivant qu'une légère inclinaison, indispensable pour l'écoulement de l'eau. Pour faciliter le travail, le long de la galerie, à une certaine distance les uns des autres, on creuse des puits servant au déblaiement de la terre. La galerie atteint enfin le niveau aquifère a , alimenté par l'eau du fleuve infiltrée dans le sol. Cette eau, suivant le fond de la galerie, aboutira dans les champs, les jardins

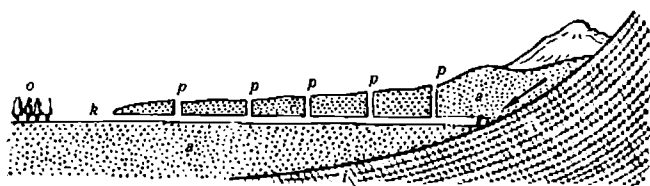


Fig. 51. Coupe d'un kiarize.

i — couches imperméables, a — couches aquifères et perméables, p — puits, k — ombouchure du kiarize, o — oasis. La flèche indique la direction d'infiltration de l'eau de la rivière, issue des montagnes.

fruitiers, les potagers. Les kiarizes nécessitent un travail pénible et dangereux dans les terrains meubles et se détériorent rapidement à cause des effondrements, car le boisage de la voûte et des parois serait trop onéreux.

Les sources qui permettent aux eaux souterraines de déboucher à la surface ne sont pas toutes identiques. La source représentée sur la figure 49 est la plus commune et est appelée source de déversement. En d'autres cas la couche imperméable a la forme d'une cuvette, et la source apparaît au point le plus bas de la couche mise à nu (fig. 52); ces sources sont appelées sources de combe. Dans les roches dures et compactes, l'eau pénètre dans les profondeurs de la terre par les fissures des roches. Sur le flanc des montagnes ou des vallées, la fente peut apparaître à la surface, et l'eau s'en écoulera sous forme de source de fissure ou de faille.

L'eau des puits et des sources est douce la plupart du temps, elle contient si peu de sels en solution que nous ne nous en aper-

cevons pas au goût. Cependant, elle ne peut être complètement douce, car pendant son infiltration lente à travers les couches perméables elle dissout peu à peu les sels que celles-ci contiennent en quantités plus ou moins grandes. Mais dans certaines régions, l'eau des puits et des sources a un goût amer-salé, parfois si accentué que non seulement les hommes, mais les animaux et même les chameaux qui sont pourtant très peu exigeants sous ce rapport, refusent de la boire. Nous trouvons de telles sources dans les régions désertiques et semi-désertiques : dans le Sahara, en Arabie, dans le Gobi, en U.R.S.S. dans les steppes de la Caspienne et de la Turkménie. Dans ces régions le climat est sec, les pluies rares et les couches superficielles à travers lesquelles s'infiltre l'eau, sont riches en sels, surtout là, où à une époque relativement récente, se trouvaient des mers qui ont laissé leurs sédiments saturés de sels marins.



Fig. 52. Source de combe.

p — couches perméables, *i* — couches imperméables, *s* — sources à flanc de vallée.

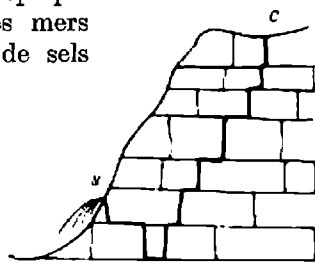


Fig. 53. Source de fissure.

c — crevasse, *s* — source.

Les sources minérales. En plus de ces eaux, assez faiblement salées, propres aux pays à climat sec, on trouve, dans différentes régions, des sources dites minérales dont l'eau est plus ou moins chargée de sels ou de gaz. Il est facile de déceler la présence de ces derniers par les bulles qui s'en dégagent; elles sont encore mieux visibles dans un verre rempli de cette eau. Ces eaux minérales sont d'aspect absolument limpide, ou jaunâtres, ou troubles, ou encore blanches comme du lait. La qualité et la quantité des sels en dissolution sont très variables. Les eaux minérales de Narzan et Borjomi sont connues dans toute l'U.R.S.S. et utilisées comme eaux de table; elles contiennent peu de sels, et le gaz, en l'occurrence gaz carbonique qu'elles contiennent, les rend encore plus agréables au goût et rafraîchissantes. Vous ne voudriez certainement pas boire certaines autres eaux minérales, comme celle de Batalinsk, par

exemple, qui est saumâtre ou sent les œufs pourris, car elles contiennent un gaz malodorant, le sulfure d'hydrogène, ou bien ont un goût de rouille par suite de leur grande teneur en fer. On n'en boit que pour le traitement de certaines maladies, suivant les ordonnances du médecin. D'après les sels et les gaz qu'elles renferment, les eaux minérales se subdivisent en eaux alcalo-carboniques, ferreuses, sulfureuses, etc.

On utilise les eaux minérales ou bien exclusivement comme boisson, ou bien pour la boisson et les bains (Narzan, Borjomi), ou principalement pour les bains — eau sulfureuse de Piatigorsk, de Matsesta, de Tskhaltoubo, l'eau saline de Staraïa Roussa, de Slaviansk, d'Oussolié. On utilise également l'eau des sources salines pour obtenir le sel de cuisine.



Fig. 54. Sources minérales ascendantes de fissure (m) et roches sédimentaires (b) sur les versants de la montagne de Fer (a).

La température des sources est d'ordinaire relativement basse et correspond à la température annuelle moyenne de la région donnée, car l'eau qui s'infiltre lentement à travers les couches perméables, proches de la surface du sol, prend leur

température qui correspond à la température moyenne annuelle. En Sibérie, où celle-ci est inférieure à zéro, dans de nombreuses régions la température des sources, quoique très basse, est toutefois de 1 à 2 degrés au-dessus de zéro, faute de quoi elles ne pourraient s'écouler. Les sources minérales, par contre, possèdent une température plus élevée et sont tièdes, chaudes ou très chaudes. Par exemple, les sources sulfureuses de Piatigorsk, les sources salines de Staraïa Roussa et autres sont tièdes; dans le Kamtchatka, il y a beaucoup de sources dont l'eau est très chaude, presque bouillante.

La haute température de ces sources montre que l'eau provient d'une grande profondeur, des couches échauffées par le "feu central". Ces sources, pour la plupart sources de faille, sont en même temps des sources ascendantes (fig. 54), car elles viennent des profondeurs du sol, alors que les sources d'eau douce froide sont en majeure partie des sources descendantes, car elles sont dues à des eaux qui descendent en s'infiltrant et s'écoulent en suivant la pente des couches aquifères. Les sources miné-

rales, surtout tièdes et chaudes, sont considérées aussi comme juvéniles, car, prenant naissance dans les entrailles de la terre, elles apparaissent pour la première fois à la surface du sol. Elles proviennent des masses en fusion en cours de refroidissement et sont, à cause de cela, minéralisées. Par opposition à cette eau "jeune", on appelle vadoses ou météoriques l'eau des sources d'eau douce froide, car elle a déjà participé plus d'une fois à la circulation de l'eau superficielle, en s'évaporant, en tombant sous forme de pluie ou de neige, s'infiltrant dans le sol, s'écoulant avec les rivières, les fleuves et atteignant la mer pour s'y évaporer de nouveau. Les exceptions sont évidemment possibles. L'eau d'infiltration peut, par exemple, en suivant les fissures des roches, pénétrer assez profondément pour atteindre les couches plus chaudes et, s'échauffant à son tour, devenir tiède, puis, par d'autres fissures, réapparaître à la surface à un niveau plus bas en conservant sa chaleur et en subissant, chemin faisant, une certaine minéralisation. Ainsi donc certaines sources minérales chaudes peuvent être vadoses et non-juvéniles. D'autre part, l'eau juvénile chaude, en montant par une fissure, peut se mélanger avec l'eau vadoses, ce qui diminuera son degré de minéralisation, abaissera sa température et lui fera prendre l'aspect d'une source froide descendante.

Pouvoir dissolvant de l'eau. Tout le monde sait que l'eau dissout certaines matières; il est facile de faire fondre dans un verre d'eau même froide un peu de sucre, de sel, de soude. Ces mêmes matières se dissolvent encore plus vite dans l'eau chaude. L'eau de certains puits et de toutes les sources minérales prouve que dans la nature également l'eau dissout certaines matières se trouvant sur son chemin. Mais la plupart des roches sont insolubles même dans l'eau chaude qui ne peut en extraire que d'infimes particules. Par contre, d'autres roches, comme le sel gemme, le gypse, les calcaires, sont plus ou moins solubles, et, s'y infiltrant, l'eau les entraîne peu à peu, parcelle par parcelle, élargissant les fissures qu'elle suit en formant des creux de diverses grandeurs. L'eau, contenant du gaz carbonique qu'elle absorbe en petite quantité de l'atmosphère terrestre, agit plus activement sur les calcaires et sur la chaux qui entre dans la composition de certaines roches. Le sel gemme est facilement dissous, le gypse beaucoup plus difficilement mais mieux, toutefois, que le calcaire. Il est facile de se convaincre de la solubilité du calcaire dans les montagnes au-dessus de la zone de végétation. Nous y trouverons des surfaces inclinées sur lesquelles s'écoule l'eau des pluies et des neiges. Nous verrons alors que la surface de ces couches

de calcaire autrefois unie, est devenue méconnaissable. Elle est sillonnée de stries plus ou moins profondes séparées par des crêtes à arrêtes aiguës. Ces stries peuvent atteindre jusqu'à un demi-mètre et plus de profondeur et les crêtes sont parfois en dents de



Fig. 55. Champ de karst sur les calcaires des monts Silberne, Suisse.

scie. Ce sont là les résultats du travail de l'eau qui s'écoule sur la surface du calcaire en le dissolvant peu à peu. Les formes bizarres qu'adoptent ces surfaces — le karst ou "lapiez", comme on les appelle — couvrent parfois des champs entiers les rendant très difficilement ou tout à fait impraticables, lorsque les stries et les crêtes sont très développées (fig. 55).

Le karst nous prouve que l'eau qui coule sous la surface du sol en suivant les fissures dans les calcaires, et à plus forte raison dans le gypse ou le sel gemme, peut dissoudre les roches et former des creux souterrains. Si ces creux sont considérables et proches de la surface de la terre, les couches sus-jacentes, sous l'influence de la pesanteur, peuvent s'affaisser, et un entonnoir plus ou moins profond et large apparaît au fond de la vallée ou sur le versant d'une montagne (fig. 56 et 57). Là où les entonnoirs sont nombreux, la construction d'édifices importants et des voies ferrées est à éviter, car de nouveaux entonnoirs peuvent se former sous les murs de la bâtisse ou la ligne de chemin de fer et provoquer une catastrophe.

Ces entonnoirs sont surtout fréquents dans les régions riches en gypses. Ainsi, par exemple, la voie ferrée menant du plateau d'Oufa à la ville d'Oufa sur le versant de la vallée de la rivière Bélaïa est construite sur des couches riches en gypses et exige de ce fait un contrôle technique soutenu et des réparations fréquentes. Les ingénieurs ont construit cette voie en négligeant les conseils des géologues, qui les avaient prévenus que ce terrain était peu sûr à cause des gypses.

Dans les régions à climat humide les effondrements de terrain, provoqués par des creux souterrains, s'emplissent d'eau et donnent naissance à des lacs, du type des lacs de combes (fig. 58), ou des marécages. Les rivières disparaissent parfois aussi dans les grottes souterraines, en laissant leur lit à sec; des sources ascendantes, alimentées par les cours d'eau disparus, apparaissent parfois dans les entonnoirs provoqués par les effondrements.

Le karst. Dans les régions à climat plus sec, de préférence dans les montagnes calcaires, se développe ce qu'on appelle le karst, provoqué par le travail souterrain de l'eau. Il est caractérisé par des entonnoirs, des effondrements, des vallées aveugles, des disparitions de cours d'eau, des cours d'eau souterrains, la rareté des bois, la pauvreté de la végétation sur les versants. Tout cela est causé par l'infiltration rapide de l'eau de pluie dans les cavernes souterraines, ce qui provoque le dessèchement du sol, et en même temps, si étrange que cela paraisse, l'apparition de marécages dans

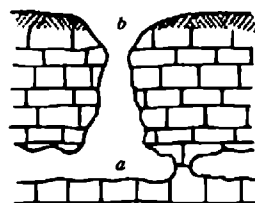


Fig. 56. Formation d'un entonnoir dans les roches solubles.

a — cavité souterraine,
b — entonnoir.



Fig. 57. Entonnoirs dans les calcaires du plateau Yaïla, près d'Aï-Pétri.



Fig. 58. Lac d'effondrement dans le karst du cours supérieur de la rivière Ious-Kara-Tach, dans l'Alataou de Kouznetsk.

les vallées aveugles quand la surface des calcaires est couverte d'une couche d'argile.

Le karst existe en U.R.S.S. en Crimée, mais il est surtout développé en Yougoslavie, dans les monts Karst (d'où leur nom). Dans les régions à climat plus humide — sur le plateau d'Oufa, à la ligne de partage des eaux de la Dvina et de l'Onéga — lorsque les montagnes font défaut, le karst est caractérisé par des entonnoirs, des lacs de combe, qui se transforment en marais, la disparition des cours d'eau dans les trous et les gouffres et leur réapparition en aval, dans le lit même ou dans les fentes des rochers. Dans la région d'Ivanovo, où les calcaires se trouvent souvent près de la surface, il y a beaucoup de lacs de combe de ce type qui atteignent une profondeur de 20 à 65 mètres. Des effondrements ont lieu de nos jours également; on note même des effondrements de maisons. Le 18 mai 1937, dans le village de Gloubokovaïa, du district de Savino, un entonnoir atteignant 100 mètres de diamètre et 20 mètres de profondeur s'est brusquement formé et rempli d'eau.



Fig. 59. Coupe longitudinale d'une caverne.

a — dépôts au fond de la caverne, *b* — entrée, *c* — salles à stalactites et stalagmites.

Les grottes sont la plupart du temps le résultat de la dissolution des roches par les eaux souterraines. Il va de soi que les régions de karst sont particulièrement riches en grottes, mais ces dernières apparaissent souvent aussi indépendamment du karst dans les roches calcaires et riches en gypses et bien plus rarement dans les roches peu solubles. La forme même des grottes prouve qu'elles sont le résultat du travail dissolvant des eaux souterraines. Il s'agit le plus souvent non pas d'une cavité isolée dans la montagne, mais de plusieurs salles ou grottes de différentes dimensions au plafond voûté, reliées entre elles par des couloirs étroits ou bas, ou par de larges galeries. Ce système de corridors et de salles est disposé sur le même niveau, ou suivant un plan incliné, ou encore en plusieurs plans étagés; il provient d'un réseau de fissures où coulait l'eau souterraine, les élargissant plus ou moins suivant la

solubilité des roches. Dans certaines grottes, des fleuves souterrains coulent encore à l'heure actuelle, dans d'autres, des lacs de différentes dimensions et remplis d'eau stagnante se sont conservés (fig. 59).

Les cavernes s'ouvrent par un orifice, souvent étroit, parfois assez large, disposé sur le versant d'une montagne ou d'une vallée à différentes hauteurs, fréquemment dans des falaises abruptes, parfois au niveau de la mer (cavernes marines). Par cet orifice, le touriste pénètre ou bien directement dans la première et parfois unique salle, ou bien doit suivre un couloir étroit et sinueux, qui tantôt s'élève tantôt s'abaisse, pour déboucher dans une salle. Certaines cavernes possèdent des issues supplémentaires, parfois sous forme de puits verticaux partant de leurs voûtes. Les dimensions des cavernes sont très variées, allant d'une salle proche de la surface jusqu'à tout un dédale de chambres et de couloirs. Ainsi la fameuse grotte du Mammoth dans l'Etat de Kentucky (U.S.A.) compte 200 galeries, d'une longueur de plus de 250 kilomètres. De l'entrée de ce labyrinthe à sa sortie il y a 16 kilomètres en ligne droite; sa salle principale a 30 mètres de hauteur. En U.R.S.S., la caverne de Koungour, la mieux explorée, atteint 2,5 kilomètres en longueur. La plupart des autres cavernes de l'U.R.S.S. se trouvant en Crimée, dans le Caucase, dans l'Oural, dans l'Altaï, dans la région transbaïkalienne, dans le Saïan oriental, ne sont pas encore explorées.

Le sol des grottes est le plus souvent jonché de débris de roches, tombés de la voûte et couverts de poussière. Ces débris se trouvent soit à même les roches, soit sur une couche de dépôts laissés dans la caverne par l'eau ou apportés par le vent à l'état de poussière. Dans ces dépôts sont souvent ensevelis les ossements des habitants des cavernes — hommes ou animaux: ours, lions, tigres, hyènes, loups, chacals, renards, puis les os des animaux que les fauves dévorent — divers rongeurs, herbivores, oiseaux. Parmi leurs autres habitants citons les chauves-souris et certains oiseaux — chouettes, hiboux, pigeons, dont les ossements ne se rencontrent d'ailleurs que dans les cavernes proches de la surface. L'homme primitif, qui vivait dans les cavernes, y a laissé des ossements — les siens et ceux des animaux qui lui servaient de nourriture, les cendres de ses foyers, les restes des objets qu'il confectionnait, les instruments de pierre, d'os et autres, et sur les parois, des inscriptions et des dessins (fig. 277). C'est pourquoi nombre de grottes présentent un très grand intérêt historique et permettent d'obtenir des indications

très intéressantes en ce qui concerne la faune des temps anciens et les conditions de vie des hommes primitifs. Mais l'étude de ces restes doit être effectuée avec méthode sous la direction de savants, sans quoi on peut perdre un matériel scientifique de grande valeur. De nombreux sites archéologiques ont été gâtés par des amateurs non avertis. En U.R.S.S. les fouilles ne peuvent être effectuées que par des spécialistes en archéologie ayant carte blanche pour ces recherches.

Outre les dépôts friables, on trouve au fond de nombreuses cavernes des formations dures dues à l'action des eaux d'infiltration qui s'égouttent des voûtes. La chaux qu'elle contient en dissolution se dépose en partie pendant que la goutte est suspendue et en partie après sa chute. Ainsi, peu à peu se forment une stalactite en haut et en bas une stalagmite. Si l'eau filtre en différents endroits de la voûte, des systèmes entiers de stalactites et de stalagmites se forment. En s'accroissant et se réunissant les unes avec les autres, ils constituent des colonnes. On peut y obtenir de fort jolis effets à la lumière artificielle, mais le phénomène est peu intéressant au point de vue scientifique (fig. 60).

Les effets de lumière sont encore plus saisissants dans les grottes glaciaires, où les stalactites et les stalagmites sont de glace, car la température y est basse non seulement en hiver, mais aussi en été. En outre, sur les parois et les voûtes où l'eau ne s'égoutte pas, l'humidité forme de gros et jolis cristaux de givre qui reflètent la lumière des bougies et des torches dans leurs myriades de paillettes.

Les grottes glaciaires sont connues chez nous au Tchatyr-Dagh en Crimée, dans la région d'Orenbourg (les cavernes d'Iletz et d'Inder) et dans l'Oural. La caverne de Koungour qui se trouve près de la ville du même nom dans un endroit facilement accessible, présente une suite de salles dont chacune a sa dénomination. Reliées par des couloirs, elles forment un labyrinthe de 2,5 kilomètres de long. La partie de la caverne la plus proche de l'entrée est une grotte de glace (fig. 61) avec givre et stalactites. Dans sa partie la plus éloignée où l'air froid ne pénètre jamais, la température est toujours supérieure à zéro. Il y a dans cette grotte plusieurs petits lacs dont l'eau ne gèle jamais. Le plus grand a une superficie de 750 mètres carrés et atteint six mètres de profondeur. Des



Fig. 60. Coupe d'un stalactite et d'un stalagmite.

cheminées verticales font communiquer certaines de ces salles avec la surface; elles sont la cause de la congélation de l'eau de certaines grottes, car elles provoquent un fort courant d'air en hiver. En été, l'air froid sort de ces grottes, non pas par les cheminées, mais par l'entrée; mais comme son évacuation est très lente, les grottes n'ont pas le temps de se réchauffer. La caverne

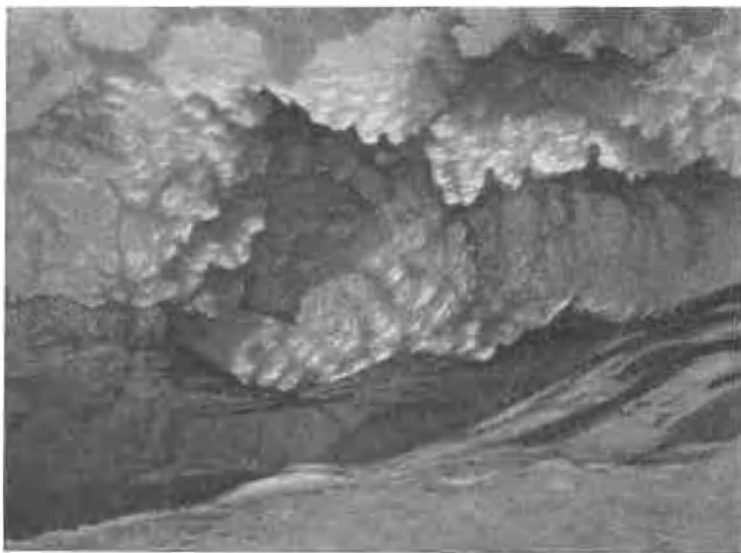


Fig. 61. La Grotte aux Diamants avec les cristaux de neige à la voûte dans la caverne de Koungour dans l'Oural.

de Koungour est formée par l'ancien cours souterrain de la rivière Silva dans les gypses et les calcaires (fig. 62).

Les grottes glaciaires existent également dans certains pays de l'Europe. La caverne Dobschau en Hongrie est particulièrement intéressante. 7 171 mètres carrés y sont couverts de glace; le volume de cette dernière est de 120 000 mètres cubes; certains murs de glace atteignent 15 mètres de hauteur.

Les dépôts des eaux souterraines. Outre les stalactites et les stalagmites, les eaux souterraines, s'infiltrant ou coulant dans les fissures des roches, laissent d'autres dépôts minéraux sous forme de veines et de filons. Ces dépôts sont constitués par du carbonate de chaux sous forme de spath calcaire (calcite minéral), de silice

sous forme de quartz et de ses variétés le cristal de roche, la calcédoine, l'opale, l'agate, plus rarement de baryte (sulfate de baryum), de fluorite (fluorure de calcium), spath manganoux, etc. Les veines peuvent contenir des paillettes de divers métaux ou minerais — or, argent, cuivre, fer, plomb, zinc, etc. Quand la teneur en métal est suffisante, on procède à l'extraction du minerai.

L'analyse de l'eau des sources minérales prouve que tous les métaux et minéraux énumérés se trouvent en dissolution dans les eaux souterraines en quantités plus ou moins grandes. Parvenant à la surface, les sources minérales forment des dépôts constitués soit de calcaire sous forme de tuf calcaire ou travertin, soit de silice sous forme de tuf siliceux ou geysérite, soit d'oxydes de fer sous forme de limonite. L'analyse permet de déceler dans le tuf de faibles quantités d'autres minéraux. L'eau que nous croyons pure dépose parfois dans les conduites du tuf calcaire qui finit par boucher tous les tuyaux. D'autres minéraux se déposent également dans les conduites

servant à mener l'eau minérale des profondeurs vers la surface, de façon qu'elle ne se mélange pas avec les eaux souterraines (captage des sources minérales), ce qui entraîne la nécessité de changer périodiquement les tubes des conduites.

Les tufs calcaires et siliceux forment quelquefois d'épaisses couches semblables à des marches avec des bassins, étagées sur le flanc des montagnes ou les versants des vallées ou sur les surfaces planes qui entourent la source (fig. 63). L'eau s'écoule en minces filets d'un bassin à l'autre, laissant dans chacun d'eux un peu des matières qu'elle contient en solution. La geysérite retombe des sources chaudes, surtout des geysers dont nous reparlerons

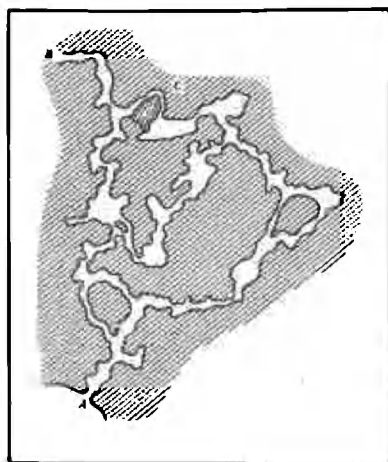


Fig. 62. Plan d'une partie de la caverne de Koungour jusqu'à la grotte des Lacs (B).

A — entrée de la grotte, C — Grotte du grand lac.



Fig. 63. "La Terrasse Blanche", dépôts de tufs siliceux des sources chaudes, Nouvelle-Zélande.



Fig. 64. Eboulis de granit dans le Khamar-Daban, sur la côte sud du Baïkal.

plus loin; les sources froides et certaines sources chaudes, comme Karlovy Vary en Tchécoslovaquie, déposent du tuf calcaire. Si l'on plonge dans une des sources de Karlovy-Vary une fleur, une feuille, ou un rameau, au bout de quelques heures ils se couvrent d'une mince couche de tuf.

Eboulements et glissements de terrain. L'eau souterraine, en débouchant à la surface dans une falaise ou à flanc de montagne, provoque souvent des effondrements ou éboulis et des glissements

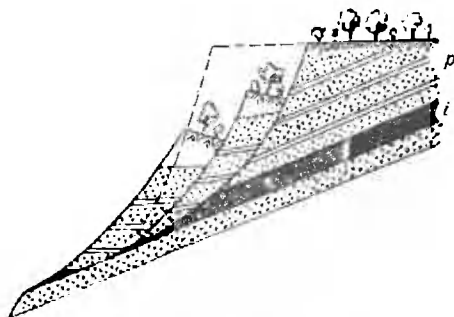


Fig. 65. Coupe d'un glissement de terrain.

p — couches perméables, *i* — couches imperméables.

de terrain qui se distinguent les uns des autres par la vitesse du déplacement de grandes masses de roches qu'ils provoquent. Lors d'un effondrement la masse de roches, se détachant de la falaise ou de la montagne, tombe ou roule vers le bas en se brisant en blocs plus ou moins gros, en éclats de roche et en blocaille qui s'accumulent au pied et en partie sur le versant. Les effondrements sont souvent provoqués par l'eau courante des fleuves qui sape les berges, ainsi que par le ressac de la mer ou des lacs, par les tremblements de terre ou des travaux imprudemment menés. Les dégâts qu'ils entraînent sont plus ou moins importants suivant l'emplacement et la masse des roches effondrées (fig. 64).

Les glissements de terrain ont lieu sur les versants formés de couches légèrement inclinées et en présence de couches perméable (*p*) et imperméable (*i*); cette dernière est habituellement constituée d'argile qui, se délayant, devient glissante; la couche supérieure se détache tôt ou tard et glisse vers le bas (fig. 65). Son déplace-

ment peut être dû à des causes différentes: tremblement de terre, fortes averses qui augmentent son poids, l'action érosive des cours d'eau ou des mers et un travail inconsideré de l'homme. Dans les roches massives, les glissements comme les éboulis peuvent avoir lieu en suivant les fissures qui sont accentuées par le travail de l'eau. En U.R.S.S., les rives de la Volga, la côte de la mer Noire près d'Odessa, la Côte Sud de la Crimée et le littoral caucasien de Touapsé à Soukhoumi souffrent beaucoup des glissements de terrain qui provoquent de grandes destructions et exigent des travaux de consolidation très onéreux. Nous décrirons plus loin des exemples d'effondrements et de glissements de terrain.

IV

LES DESTRUCTEURS DE PIERRES

Comment le soleil et le gel, l'air et l'humidité, les plantes et les animaux travaillent à la destruction des roches. L'érosion éolienne. Diverses formes de reliefs créées par l'érosion. Les éboulis. Eluvions et délutions. Formation de la terre végétale. Types de sols et leur lien avec le climat. Les terres fertiles.

Les rochers pourris. Approchons-nous d'une saillie de roche sur le bord d'un ravin, sur la rive d'un cours d'eau, d'un lac ou de la mer. A première vue, c'est un rocher, une roche dure. Mais si nous l'examinons plus attentivement, nous verrons qu'elle est sillonnée de fentes, certaines roches un peu plus, d'autres un peu moins. Il est facile d'en détacher un fragment même avec les doigts, et sous le marteau, de gros morceaux peuvent s'en séparer ou même s'effriter en menus débris ou en poussière. Nous pouvons remarquer aussi des taches et des raies ressemblant à de la rouille et des colonies entières de lichens petits et grands. Et l'idée que nous nous faisons de la solidité du rocher se trouve ébranlée. La roche apparemment dure qui le forme semble être pourrie, des débris de différentes dimensions jonchent le sol. Les changements que subissent les roches et qui entraînent leur destruction portent le nom d'érosion.

Quelles sont donc les forces qui désagrègent des roches aussi dures que le granit, la quartzite, le marbre et autres dont on se sert pour ériger des bâtiments pour une longue durée ? Les calculs de l'homme ne sont-ils donc pas bien fondés ?

Oui, jusqu'à un certain point. Ces édifices ne sont durables qu'en comparaison avec la courte vie humaine ; en réalité, ils se détruisent peu à peu aussi, car ils sont soumis à l'action des mêmes forces de la nature que les roches vives.

Les destructeurs des pierres. Nous connaissons bien ces forces, nous nous heurtons à elles quotidiennement et ne les considérons pas comme réellement puissantes, capables de détruire des pierres. Ces forces sont: le chaud et le froid, la pluie et la neige, l'eau et le vent, ainsi que les humbles plantes et les animalcules. Comment ces forces travaillent-elles donc ?

Par les jours chauds, ensoleillés, les rochers sont fortement chauffés; vous pouvez vous en convaincre par un beau jour d'été en posant la main sur l'un d'eux. Les nuits sont plus fraîches, et le rocher se refroidit. Ces passages du chaud au froid et vice versa sont particulièrement brusques au printemps et en automne, quand le soleil est chaud le jour et qu'il gèle souvent la nuit.

Les roches, comme tous les autres corps, se dilatent, augmentent de volume sous l'action de la chaleur et se contractent en se refroidissant. Ces dilatations et contractions sont très faibles; mais lorsqu'elles se succèdent pendant des centaines et des milliers d'années, elles finissent par avoir de l'effet; la liaison entre les particules qui forment la roche devient plus faible; leur cohésion s'affaiblit d'autant plus que les grains de la pierre sont plus gros, car ils se dilatent et se contractent plus fortement que les grains fins. La couleur de la roche a, elle aussi, une certaine importance: les roches noires, et en général de couleurs sombres, sont plus fortement chauffées et, par conséquent, se dilatent plus que les roches de couleurs claires, qui réfléchissent mieux les rayons solaires. Pour vous en convaincre, exposez par un jour d'été ensoleillé deux cailloux, l'un noir et l'autre blanc, aux rayons du soleil, et voyez après quelque temps lequel des deux est plus chaud.

La couleur des différents grains composant la roche a la même importance. C'est pourquoi la cohésion entre les grains de différentes couleurs formant le granit, par exemple, et qui sont noirs, blancs et rougeâtres, s'affaiblit plus rapidement que dans les roches constituées de grains d'une même couleur, noire par exemple. Voilà pourquoi les roches composées de gros grains de différentes couleurs résistent moins aux changements de températures.

L'affaiblissement de la liaison entre les différents grains formant la roche finit par entraîner leur désagrégation; les grains se détachent les uns des autres, la roche perd de sa solidité, elle se désagrège en composants élémentaires et, de roche compacte, elle devient sable ou gravier.

L'eau facilite le travail du chaud et du froid. Pendant les pluies, les rochers s'imbibent d'eau, les roches poreuses, fortement

fissurées, tout particulièrement, les roches compactes — moins. Puis elles redeviennent sèches. Le passage réitéré de l'état humide à l'état sec est également nuisible à la cohésion entre les parcelles des roches. L'eau, en gelant dans les fissures et les pores des pierres, exerce une action encore plus violente. Cela a lieu en automne quand il gèle après la pluie, ou au printemps lorsque la neige fond au soleil et que l'eau pénètre dans les roches pour geler la nuit.

L'eau en gelant se dilate. Tout le monde sait que si on laisse au gel une bouteille bouchée pleine d'eau, la glace qui se formera dans la bouteille ou bien brisera celle-ci ou bien chassera le bouchon en montant par le goulot. Cette dilatation de l'eau se transformant en glace dans les fissures et les creux des rochers, augmente leur largeur et rompt la liaison entre les grains de la roche, car l'eau pénètre dans les fissures les plus minces, invisibles à l'œil nu.

De plus, l'eau de pluie et de fonte en s'infiltrant dans les roches exerce sur elles une action chimique, car elle contient en dissolution les gaz de l'atmosphère, notamment l'oxygène et le gaz carbonique. L'oxygène est un gaz actif contenu dans l'air; il entretient la combustion, provoque l'oxydation de certaines matières en entrant en combinaison avec elles. Le gaz carbonique de l'air est un produit de la respiration des animaux et des plantes, de la combustion dans les foyers des habitations, dans les moteurs des automobiles et des avions, dans les foyers des locomotives. L'eau qui tombe sur les roches sous forme de pluie ou de neige contient toujours de l'oxygène et du gaz carbonique. Elle agit sur les roches plus énergiquement que l'eau dont ces gaz sont absents. Elle dissout les grains de calcaire, décompose les grains de feldspath (minéral que contiennent de nombreuses roches) en le transformant en argile, elle détruit les paillettes de mica noir, les grains d'amphibole et de magnétite, en oxydant le fer qu'ils renferment et en le transformant en ocre.

Les végétaux altèrent également les roches. Les lichens se fixent même sur les rochers les plus lisses. Le vent apporte leurs spores minuscules dans les fentes les plus fines et les colle à la surface des rochers mouillés par la pluie. Elles germent et s'agrippent à la roche en suçant avec l'eau les sels nécessaires à leur existence, rongent la surface des pierres et élargissent les fentes. Les grains de sable et de poussière apportés par le vent ou entraînés par l'eau dévalant des versants, adhèrent mieux à la pierre rongée et emplissent davantage les fentes élargies. Ces grains de

sable et de poussière forment peu à peu un terrain favorable aux plantes dites supérieures: herbes et fleurs. Leurs graines, également apportées par le vent, atteignent les fissures pleines de sable et de poussière, se collent au sable qui s'est accumulé entre les lichens et y germent. Puis entre les fentes apparaissent des brins



Fig. 66. Un précipice de la berge de la Koura avec les plantes qui y ont pris pied, Borjomi. Caucase.

d'herbes, une tige de fleur, les plaques de lichens se couvrent d'herbes. Les racines de ces plantes sont longues et tenaces; elles pénètrent dans le rocher de plus en plus profondément et rongent sa surface. Les fentes s'élargissent, s'emplissant de plus en plus de sable et d'humus venant des plantes, de leurs racines mortes, et ainsi la place se trouve prête pour l'existence, peut-être précaire, des arbustes et des arbres dont les graines sont apportées

par le vent, l'eau ou les insectes. Les racines des arbustes et des arbres sont fortes et vivaces : à mesure de leur croissance, elles agissent comme des coins, élargissant de plus en plus les fentes où elles pénètrent.

On voit souvent dans les montagnes des arbustes et des arbres verts qui poussent dans les fentes d'un rocher lisse et nu, et il semble miraculeux qu'ils aient pu s'y aggripper et s'y maintenir (fig. 66). On peut voir les fentes élargies par les racines au point que l'on peut y passer la main ; parfois les racines détachent de la roche mère des blocs entiers (fig. 67).

Tous les végétaux sont nuisibles aux rochers en ce sens qu'ils dégagent en respirant du gaz carbonique qui, en se dissolvant dans l'eau des pluies et des neiges, forme de l'acide carbonique et augmente ainsi, comme il a été dit plus haut, le pouvoir destructeur de l'eau. De plus, les parties mortes des plantes — tiges, feuilles, racines — produisent en pourrissant d'autres acides qui, avec l'eau, rongent les grains des roches.

Ainsi petit à petit, jour après jour, année par année, siècle par siècle, ces forces invisibles travaillent à la destruction des roches, à leur érosion. Nous ne voyons pas comment elles agissent, mais nous rencontrons partout les résultats de leur travail : tel rocher, qui n'était primitivement sillonné que de fentes imperceptibles, suites du refroidissement ou de la dessiccation, ou encore de la formation des plis (comme nous le verrons plus loin), se trouve plus ou moins fortement endommagé par suite de l'érosion ; les premières fentes se sont élargies, de nouvelles fissures sont apparues en plus grand nombre, des éclats plus ou moins grands se sont détachés de partout et jonchent le sol au pied du rocher en formant de petits tas ou, plus loin sur le versant, des cônes d'éboulis. La surface lisse du rocher est devenue rugueuse, raboteuse, rongée, on y voit en certains endroits des lichens, en d'autres des fentes et des rigoles, des coulées noires ou couleur de rouille.

Ces forces — le chaud et le froid, la rosée et la neige fondante, l'eau qui s'infiltre à l'intérieur et les plantes — ne travaillent

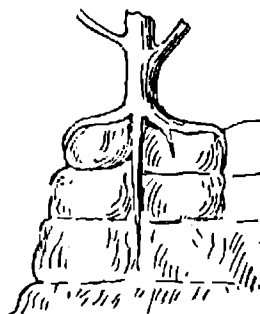


Fig. 67. Destruction d'un rocher par les racines d'un arbre.

pas seulement pour leur propre compte, mais facilitent encore le travail d'autres forces de la nature: le vent et la pluie. La pluie ne peut rien contre un rocher lisse, le vent non plus: la roche est trop dure, compacte, ses grains sont trop fortement soudés; mais la pluie entraîne tous les grains dégagés du rocher par l'érosion. Les gouttes de pluie, se réunissant en minces filets d'eau, finissent par creuser des rigoles dans la pierre. Le vent peut aussi emporter les particules détachées du rocher, casser les saillies rongées et les emporter ou les précipiter au pied du rocher. Le vent souffle plus fort sur les cimes des montagnes que dans les vallées ou les plaines, et plus le rocher est élevé, plus la poussée du vent est forte; son action augmente aussi sur les pics aigus et les crêtes, où le gel et la chaleur lui facilitent le travail.

Si vous demeurez quelque temps en haute montagne à la même place, à proximité de rochers abrupts, vous pourrez entendre de temps en temps le bruit des blocs tombants ou le bruissement des pierres qui glissent sur les éboulis. Quand il vente ou après qu'il a plu, ou bien par une nuit de gel, ou encore au printemps, lorsque les neiges fondent, ces bruits, témoignant de la destruction progressive et perpétuelle des montagnes, sont encore plus nombreux.



Fig. 68. Aiguille de grès tendres et d'argiles dans la "Ville d'Eole" sur les bords de la rivière Diam, Dzoungarie.



Fig. 69. Selle de grès tendres et d'argiles dans la "Ville d'Eole".

Les formes de relief. Les forces d'érosion non seulement accélèrent et facilitent le travail de l'eau courante, du ressac et du vent, mais la plupart du temps le rendent en général possible. L'activité de ces forces que l'on appelle agents géologiques, crée la majeure partie des diverses formes de la surface terrestre que nous voyons et dont nous admirons la beauté et l'originalité.

On peut subdiviser ces formes en positives et négatives, grandes et petites.

Les grandes formes positives sont les chaînes de montagnes, les cimes et les contreforts, alors que les vallées, les gorges et les creux sont les grandes formes négatives.

Parmi les petites formes, que l'on peut rencontrer isolément ou en combinaison avec les grandes formes et qui rendent ces dernières encore plus variées, les tours, les colonnes, les aiguilles, les tables, les champignons, les pierres branlantes sont positives, et les niches, les poches, les cheminées, les cellules, les alvéoles sont négatives. Ces petites formes sont mieux visibles, elles nous donnent une idée du degré de destruction et d'érosion qui président à leur formation; elles nous permettent souvent de le mesurer de façon précise. Ces petites formes sont surtout fréquentes dans les déserts où elles sont d'ailleurs les plus variées. On les doit en majeure partie au travail du vent: c'est dans le désert qu'il atteint

sa plus grande force par suite du manque total ou presque total de végétation, qui, en d'autres endroits préserve le sol et les versants de ses attaques. Mais sur les crêtes et les cimes des montagnes ces formes sont également fréquentes et variées; le vent est, là aussi, le principal architecte, avec l'aide du gel et de la neige.

Voici, par exemple, une aiguille (fig. 68) que j'ai photographiée dans le désert de Dzungarie sur les bords de la rivière Diam, dans un site surnommé "Ville d'Eole", car il présente une combinaison des formes les plus diverses rappelant les ruines d'une ville (murs, remparts, tours, rues) et qui sont l'œuvre du vent. Cette aiguille est formée de grès relativement tendres et d'argiles sablonneuses en couches régulières; sa hauteur atteignant près de vingt mètres atteste qu'une couche de grès de la même épaisseur a été détruite autour d'elle. Elle-même n'a subsisté que grâce à de nombreuses concrétions calcaires, qui ont renforcé son extrémité; les couches inférieures, sous la défense de cette partie plus dure, se sont conservées, elles aussi.

Dans ce même site on trouve un relief en forme de selle flanquée



Fig. 70. Champignon d'Eole à Vadi Tarfech, Egypte.

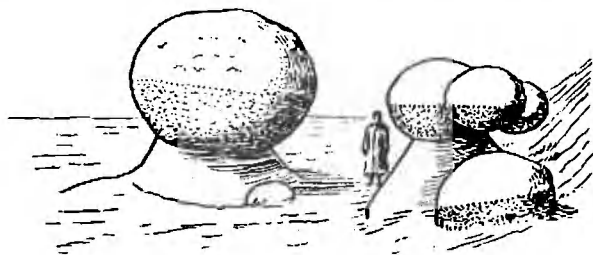


Fig. 71. Les boules d'Eole dans le désert de la presqu'île Mangychlak.

de deux tours (fig. 69) qui est au moins aussi élevé et impressionnant. L'homme sur la tour de gauche nous aide à nous faire une idée de la hauteur de la tour et de l'importance des couches emportées. On voit sur les deux photos que la végétation fait complètement défaut et que le sol n'est pas défendu contre l'action du vent.

Quand une couche dure et résistant bien à l'érosion repose sur une couche plus tendre, des formes apparaissent qui rappellent des champignons (fig. 70 et 73) et des tables. Grâce à leur dureté les concrétions sphériques et lentiformes provoquent l'apparition de formes originales, notamment dans le désert de la presqu'île Mangychlak (fig. 71).

Sur les sommets de certaines montagnes de l'Oural on rencontre des groupes de colonnes de quartzite dure, qui ont survécu à une couche de cette roche emportée par l'érosion (fig. 72). Des piliers semblables, mais en granit se trouvent également dans le nord



Fig. 72. Piliers de schistes quartzeux sur le mont Bolvan-Ise, Oural septentrional.

de la Sibérie. Les cristaux de neige et les grains de poussière y sont pour une grande part, car, entraînés pendant les tempêtes de neige par les vents violents qui soufflent de la mer, ils burinent peu à peu les flancs des colonnes. Il est probable que ces minuscules artisans ont aussi joué un rôle important dans la formation des colonnes de l'Oural. Dans le nord de la Sibérie, les Iakoutes appellent ces colonnes "kiguiliakh"; on les considérerait comme des hommes pétrifiés ("kigui" — homme; "kiguiliakh" — humain).

Les pierres branlantes ne sont pas moins originales. Ce sont de gros blocs qui se sont conservés lors de la dégradation d'un massif de roche dure, comme celui qui est représenté sur la figure 77 (cette pierre est portée par une base étroite et oscille sous les coups de vent). Les pierres qui reposent sur plusieurs pieds sont intéressantes elles aussi. Une pierre de ce genre est représentée sur la figure 78. Elle se trouve dans la chaîne montagneuse de Kalbine dans le Kazakhstan oriental et celle de la figure 79, dans la Dzungarie.

Les roches massives composées de gros grains de différents minéraux, comme le granit, sont érodées d'une façon particulière que l'on pourrait appeler desquamation. La succession répétée

de la dilatation et de la contraction, provoquées par les variations de températures, n'affecte pas les couches profondes de la roche qui est mauvaise conductrice de la chaleur. Ces variations dans sa couche superficielle entraînent l'apparition d'une fente qui la sépare des couches plus profondes. Il se forme une sorte de coquille qui en se fendillant tombe au pied du rocher. Ainsi le dur granit se détruit peu à peu et finit par se transformer en un tas de pierres sphéroïdales (fig. 80).

Les roches massives qui se sont formées par suite du refroidissement du magma dans les profondeurs de la terre portent toujours tout un système de fissures dues au refroidissement. Elles sont très fines, presque imperceptibles quand la roche se trouve dans les entrailles de la terre, mais quand, avec le temps, elle apparaît à la surface, l'érosion commence à élargir les fentes et la roche tombe en morceaux. Ces fentes sont appelées diaclases.

Dans les granits, les fissures qui divisent la roche en pans ressemblant à des matelas sont particulièrement fréquentes. La figure 81 montre des blocs de granit en forme de matelas.

Ce même granit et les grès grossiers se couvrent souvent de cannelures qui comme l'ulcère rongent toute la surface. Elles



Fig. 73. Champignon d'Eole de grès crayeux près de Schandau, Suisse saxonne.



Fig. 74. Colonne d'Eole. Tour de "Château de l'Intrigue et de l'Amour", près de Kislovodsk. Caucase.

proviennent la plupart du temps d'une fissure où la neige ou l'eau s'accumule; la liaison entre les différents grains se trouve rompue, certains d'entre eux s'en vont avec le vent et une poche ou niche se forme ainsi; l'humidité s'y accumule et le processus progresse, la niche gagne en profondeur, s'agrandit. La voûte de la niche, toujours à l'ombre, se détériore plus vite et des orifices y apparaissent parfois de cette façon. Des niches voisines peuvent se

réunir par suite de la destruction des parois mitoyennes, en formant des galeries, où les restes des parois se dressent comme des colonnes. Ces galeries sont parfois de dimensions telles qu'un homme peut s'y glisser. Dans les grès où les couches de différente dureté alternent, des séries de niches et de galeries se développent et finissent par conférer à la roche une structure alvéolaire. Ces formations ne se trouvent pas seulement dans les déserts où elles se rencontrent le plus souvent. Elles sont nombreuses dans les montagnes près de Kislovodsk (Krasnoïé Solnychko, Rébrovaïa Balka), en Crimée, dans l'Oural du Sud, dans le Kazakhstan et près du lac Kolyvan dans l'Altaï.

L'importance du facteur température dans la désagrégation des roches devient particulièrement évidente quand



Fig. 75. Colonnes éoliennes de calcaires cambriens. Rive gauche de la Léna entre les villes d'Olekminsk et d'Iakoutsk.



Fig. 76. Les rochers "Les Plumes", un des "Piliers" de granit sur la rive droite de l'Iénisséï, près de Krasnoïarsk.

on voit de gros blocs ou des roches fractionnés en plusieurs morceaux par des fissures, mais se trouvant encore côte à côte, ce qui permet d'établir les liens qui les unissaient tout récemment. On peut observer de telles pierres éclatées dans chaque désert. Outre les gros blocs, très apparents, on peut trouver des éclats plus petits provenant des différentes étapes de la destruction.

Par suite de l'érosion, les roches constituées de schistes fins se divisent en plaques et, s'écartant en éventail à la surface du rocher ou du bloc, forment des brosses très originales.

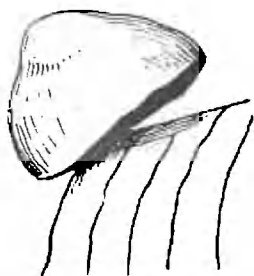


Fig. 77. Pierre bran-
lante Tandil, Buenos-
Aires, Argentine.

Le hâle ou vernis du désert est un produit très particulier de l'érosion. C'est une couche très mince, d'une épaisseur de quelques centièmes de millimètre, se formant à la surface des rochers, des pierres et même des galets; elle est brun foncé ou noire, plus ou moins brillante et ressemble à une couche de vernis dont on aurait enduit la pierre. Cette croûte est composée de sels de fer, de manganèse et de silice; la croûte la plus sombre et la plus brillante se forme sur les roches les plus dures et au grain le plus fin, contenant ces éléments; elle forme des



Fig. 78. Bloc de granit sur pattes "Le Crapaud" dans la
chaîne de Kalbine, Kazakhstan oriental.

taches brunes sur le granit au gros grain, et sur le quartz pur des taches mates brun jaunâtre. Il est à noter qu'elle ne se développe que sur la face extérieure des grosses pierres et des débris, faisant totalement défaut sur la face qui touche la terre.



Fig. 79. Bloc de granit sur pattes dans la chaîne de Djaïr, Dzoungarie.



Fig. 80. Chaïtan-Obo dans la chaîne de Djaïr, Dzoungarie.
Affleurement de granit disloqué en boules.



Fig. 81. Affleurement de granit en forme de matelas dans les monts Arkat au sud de Sémipalatinsk.



Fig. 82. Rigoles et corniches d'érosion éolienne dans les grès rouges du bassin de la rivière Djity-Ogouz, Tian-Chan.

Dans le désert, où le vernis est particulièrement développé, le paysage adopte un aspect tout à fait singulier: tous les rochers, ainsi que les pierres et les débris dans la plaine sont noirs et, lors-

que le temps est couvert, forment un tableau sombre, lugubre. Mais dans un éclairage favorable, le paysage s'anime: le vernis, comme des miroirs, reflète les rayons du soleil et des feux bleus semblent s'allumer partout sur les versants, parmi les rochers et les pierres. L'origine de ce vernis n'est pas encore tout à fait claire. On suppose que c'est la rosée qui joue le



Fig. 83. Alvéoles d'érosion dans les grès calcaires de la rivière Alma, Crimée.

rôle principal dans sa formation, en se déposant sur les pierres, ainsi que la fine poussière qui provient de l'air. Quant aux sels, ils peuvent être extraits par la rosée des pierres mêmes et de cette poussière. Les boules de granit (fig. 80) sont entièrement couvertes de cette croûte désertique qui entrave considérablement les recherches géologiques, en cachant la couleur et le grain des roches.

Les éboulis. A part les petites formations positives et négatives qui viennent d'être décrites, l'érosion crée des formes plus considérables. Les débris s'accumulent au pied des rochers en cours de destruction en constituant sur les versants des éboulis relativement importants, souvent assez mobiles et difficilement franchissables, composés de gros blocs ou du gravier (fig. 86 et 87). Sur

les surfaces planes horizontales, de grands tas de ces débris se forment. Sur les faces unies des cimes montagneuses les affleurements de roches dures se fragmentent sous l'action de l'érosion en formant des amas chaotiques appelés mers de rochers (fig. 88). Ces accumulations de pierres sont surtout fréquentes en Sibérie et dans l'Arctique, où leur apparition est favorisée par action combinée des températures très basses et de l'humidité des brouillards, des pluies et des neiges fondantes. Mais dans le Sud également, les cimes montagneuses qui s'élèvent au-dessus de la limite des neiges éternelles, où le climat est presque arctique, se désagrègent plus intensément et font naître des éboulis et des mers de rochers qui sont les produits de l'érosion et où le rôle principal échoit au gel, d'où leur nom de gélivures.

Éluvions et déluvions. Les produits de l'érosion qui demeurent à l'endroit où ils se sont formés sont appelés éluvions. Ils peuvent présenter de gros blocs, comme les éboulis précités, et des débris plus fins, provenant du travail destructeur ultérieur des forces d'érosion, dont les plus actives sont les agents chimiques. Sous l'action de l'eau contenant de l'oxygène et du gaz carbonique, toutes les roches se transforment finalement en sable, en terre sablonneuse, en terre argileuse ou en argile, suivant leur composition. La quartzite, composée de quartz pur, se transforme en sable pur, blanc ou jaunâtre, si le quartz est ocré; le grès donne un

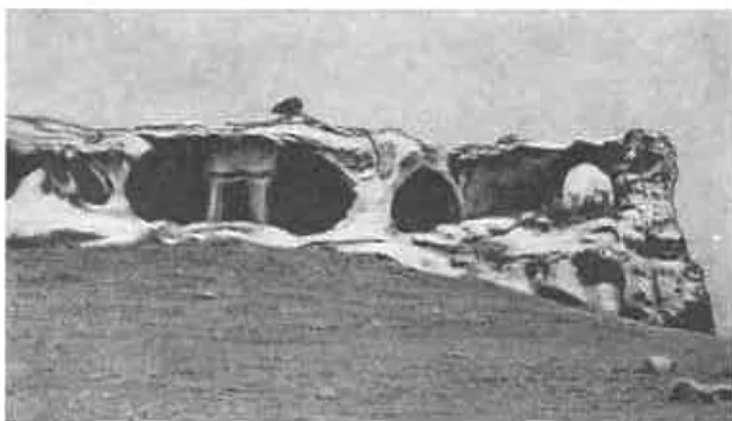


Fig. 84. Niches éoliennes dans les grès de la montagne Koltso (Montagne-Anneau) sur la rive gauche de la rivière Podkourmka, près de Kislovodsk. Caucase.



Fig. 85. Portique d'Eole Prébistore dans les grès crayeux,
Suisse saxonne.

sable argileux, le granit, tout d'abord du gravier constitué de grains isolés, puis de la terre argileuse, le schiste argileux, de l'argile. Le calcaire, impur la plupart du temps, perdra son carbonate de chaux dissous et emporté par l'eau qui laisse un résidu sous forme d'argile, pure ou sablonneuse. Ces produits finaux de l'érosion se trouvent mêlés en proportions plus ou moins grandes au cailloutis et aux débris se trouvant à différents degrés de destruction.

Les produits de l'érosion qui se trouvent sur les versants des montagnes ou des vallées sont appelés déluvions; celles-ci se distinguent des éluvions en ce qu'elles ne se trouvent pas au lieu de leur formation, mais roulent ou glissent vers le bas sous l'action de la pesanteur. Les éboulis sous les rochers sont les déluvions les plus grossières; tous les versants, à l'exclusion des falaises et des rochers, sont couverts d'une couche plus ou moins épaisse de déluvions où le matériau grossier est mêlé au matériau plus fin. Les déluvions imprégnées d'eau peuvent se déplacer, glisser vers le bas, d'habitude très lentement, parfois assez vite. Fortement humectées d'eau, elles se transforment en boue visqueuse qui glisse vers le bas, arrachant les herbes, déracinant les arbustes et renversant même des arbres qui croissent sur elles. Ces coulées de

boue, d'une longueur et d'une largeur parfois considérables, ont été observées dans de nombreux pays. Elles s'arrêtent au fond de la vallée, en formant un champ de boue avec des mottes de terre, des arbres et des buissons déracinés.

La formation de la terre végétale. On peut observer le passage de la roche dure à l'état d'éluvion et de déluvion dans la partie inférieure du versant, surtout sur les bords des tranchées qui sont creusées pour la construction des voies de chemin de fer ou des chaussées qui ont mis à nu une partie du versant couvert de déluvions auparavant. Vous verrez au bas de cette coupe les roches dures, mais fissurées; plus haut le fendillement est plus accentué et la roche se divise en blocs et en éclats; plus haut encore, ces débris sont mélangés au sable, au sable argileux ou à l'argile, les déluvions; tout en haut de la coupe nous voyons une couche plus ou moins épaisse de terre sombre ou noire traversée par les racines des plantes et qu'on appelle terre végétale ou terre arable (fig. 89). Ce passage de la roche dure à la terre arable forme l'écorce d'érosion.



Fig. 86. Eboulis à flanc de montagne. Vallée de la rivière Mouk-Sou, Pamir du Nord-Ouest.



Fig. 87. Veines de pegmatites, traversant un massif granitique, chaîne du Turkestan.

A part les agents de l'érosion — le chaud et le froid, l'eau contenant de l'oxygène et du gaz carbonique — les racines et les parties mortes des plantes ainsi que les organismes microscopiques, les bactéries, prennent une part active à la formation d'une couche de terre arable à la surface des éluvions et déluvions. Les sols sont très différents, ce qui dépend non seulement du matériau initial, c'est-à-dire des roches qui ont servi à la formation des déluvions et des éluvions, mais aussi du climat qui détermine le rôle de tel ou tel autre agent d'érosion, ainsi que le caractère de la végétation. La roche, à partir de laquelle le terrain s'est formé par suite d'érosion, est appelée roche mère. Sous différents climats les mêmes roches mères peuvent se décomposer en produits divers; certains d'entre eux demeurent sur place et forment partie du sol, d'autres sont transportés vers les couches plus profondes de l'écorce d'érosion, d'autres enfin sont entraînés par les eaux souterraines. Les différences de climat conditionnent la répartition des sols en zones correspondant aux zones climatiques; le climat tropical forme des sols d'un type donné, le climat tempéré d'un autre type, le climat arctique produit un troisième type de sol. L'influence de la roche mère se manifeste par des écarts plus ou moins grands par rapport au type de sol donné caractéristique pour le climat en question.

Les pédologues distinguent les types de sols suivants:



Fig. 88. Mer de rochers sur les cimes de montagnes de la région de Bodaïbo, Sibérie orientale.

Le type latéritique est propre au climat tropical et en partie au climat subtropical. Ces sols sont de couleur rouge ou rouge-jaune, suivant le degré de concentration de l'oxyde rouge de fer dans les couches supérieures de l'écorce d'érosion. En U.R.S.S., des sols de ce genre appelés "krasnozioms" ou terres rouges se rencontrent dans le Caucase, dans la Transcaucasie, en partie sur la Côte Sud de la Crimée et en Asie centrale. Ils s'élaborent dans les climats chauds et humides.

Le type dit des steppes se rencontre dans les climats chauds et secs. Dans les steppes sèches, les terrains de ce type ont une couleur marron ou brune, et si les précipitations atmosphériques sont abondantes, une couleur noire. En Union Soviétique, ces sols sont répandus en Ukraine, en Crimée, au Caucase, en Asie centrale, dans le sud de la Sibérie, dans les régions des terres noires de la Fédération de Russie. Ces terres sont les plus fertiles, parce que grâce au climat sec les sels minéraux, indispensables aux plantes, demeurent dans les couches superficielles de l'écorce d'érosion. Dans les "tchernozioms" ou terres noires, la couleur est due à la grande quantité d'humus, qui est un engrais naturel de ce sol.



Fig. 89. Passage de la roche dure à la terre végétale.

Le type podzolique est particulier aux climats tempérés et humides. L'abondance de l'eau est cause de ce que les sels solubles se trouvent entraînés vers les couches plus profondes aux dépens des couches supérieures qui perdent ainsi en fertilité. Les sols de ce type sont cendreaux ou gris jaunâtre, couverts d'une mince couche noire contenant de l'humus. Ces sols couvrent la partie nord de l'U.R.S.S. évoluant vers le sud en sols dits steppiques.

Les types marécageux, salifères se rencontrent dans tous les climats sous réserve de certaines conditions particulières. Les terrains marécageux sont abondants dans les endroits où l'eau souterraine se trouve presque à la surface, c'est-à-dire dans les dépressions et les marais. Le type salifère est caractérisé par l'abondance des sels du sodium, nuisibles à la plupart des plantes, et se forme dans des conditions particulièrement favorables à la

concentration de ces sels dans les couches supérieures de l'écorce d'érosion. Les terrains salifères à base podzolique et à base de terre noire sont légèrement différents.

La formation et la transformation des sols sont des processus extrêmement complexes et l'on ne peut les comprendre qu'en possédant des connaissances solides en chimie. C'est pourquoi nous nous bornons à ce qui vient d'être dit ne donnant qu'une idée d'ensemble des différents types de sols et de leur répartition suivant les zones climatiques. Notons encore qu'à mesure que nous nous élevons dans les montagnes, le climat varie tant en ce qui concerne la température que l'humidité, c'est pourquoi les sols se répartissent également en zones sur les versants des montagnes dans le sens vertical. En haute montagne et dans l'Arctique où la température du sol est en général inférieure à zéro, ce qui affaiblit considérablement les processus chimiques et où les agents mécaniques jouent un rôle prépondérant (simple destruction de la roche mère en éclats plus ou moins gros), on distingue encore les sols squelettiques, qui sont un simple mélange de ces débris, n'ayant presque pas subi de modification chimique. Ces sols se forment aussi dans les déserts, où le manque d'eau ralentit également les processus chimiques, et les brusques écarts de température favorisent le morcellement de la roche mère.

La fertilité du sol dépend de la composition des sels facilement solubles et assimilables par les plantes, de la répartition de ces sels dans l'écorce d'érosion et de la structure du sol. Si le sol est très compact et dur, difficilement perforable pour les fines racines, il sera, même si les quantités de sels sont suffisantes, moins fertile qu'un sol poreux, où les racines et l'air pénètrent facilement. Ce dernier est indispensable tant pour les processus d'oxydation qui ont lieu sous terre que pour la vie des bactéries qui décomposent les restes végétaux dans le sol et facilitent ainsi le dégagement et l'accumulation de l'azote indispensable aux plantes. Le but principal que l'on poursuit en incorporant aux sols des engrais organiques est d'y introduire des composés de l'azote. Les animaux fouisseurs, les taupes, les insectes et les vers de terre qui creusent des galeries, aident à rendre le sol plus meuble, à transporter les éléments qui le composent d'une couche à l'autre, à émietter et à transformer ces éléments.

Les plantes qui se développent sur le sol et en extraient les matières nécessaires à leur croissance et à leur fructification, dans les conditions naturelles, lui rendent ce qu'elles lui ont pris sous

forme d'humus en y' ajoutant le gaz carbonique et l'oxygène qu'elles absorbent de l'air. Les plantes cultivées par l'homme, par contre, sont utilisées par ce dernier entièrement ou en partie (sans les racines pour les céréales, avec les racines pour beaucoup de légumes). Elles épuisent le sol de plus en plus et leur culture exige chaque année différentes sortes d'engrais pour lui restituer les matières nécessaires au développement des plantes.

V

LE TRAVAIL DU VENT A LA SURFACE DE LA TERRE

Les tempêtes de poussière. Le simoun. Les trombes.
Le transport du sable et de la poussière. La formation
des dunes maritimes. Les dunes du désert. Le mouve-
ment des sables et la lutte contre eux. Les tas de sable.
Les sources de poussière. L'entraînement des poussières
du désert. Le loess — sol de poussière, sa répartition
et son importance. Les types de déserts.

Un temps sec prolongé pendant la saison chaude est toujours accompagné de poussière. La terre des chemins battus, des labours, des versants dépourvus de végétation et des ravins dénudés se dessèche fortement et se pulvérise facilement; les fines particules ainsi formées sont soulevées et emportées par le vent. Même les rues pavées ou asphaltées des villes produisent de la poussière et doivent être arrosées. Les coups de vent soulèvent sur les routes et, au printemps sur les labours, des nuages de poussière, dont l'air s'emplit en devenant opaque; les horizons lointains disparaissent dans une sorte de brume. Les espaces sablonneux produisent beaucoup de poussière; quoique balayés fréquemment par le vent, ils offrent à tout vent fort du matériau fin à emporter, car les processus de désagrégation et d'érosion continuent et émettent sans cesse les grains de sable.

Les tempêtes de poussière. Nous pouvons observer parfois de véritables tempêtes de poussière, surtout dans le Sud de l'Union Soviétique, au printemps, quand les nombreux labours ne sont pas encore défendus par les pousses vertes, les pluies en avril et mai étant quelquefois trop rares. Pendant ces tempêtes, le ciel se couvre complètement d'un épais nuage de poussière. Le soleil est à peine visible et semble un disque rouge; la poussière pénètre jusque dans les habitations par les portes et les fenêtres fermées;

dans la rue elle aveugle les passants, crisse sous les dents, rend la respiration difficile.

En Afrique, dans les déserts sablonneux, on appelle les tempêtes de poussière "simoun"; ce n'est déjà plus une tempête de poussière à proprement parler, c'est une tempête de sable. Les tempêtes de poussière sévissent également en Chine septentrionale et en Mongolie méridionale (où on les appelle "hyi-fyn" (vent noir) et "houang-fyn" (vent jaune) suivant la couleur de la poussière locale) et en d'autres pays, notamment en Australie (fig. 90).

La poussière s'élève même par temps calme. Par les jours chauds d'été nous pouvons voir subitement apparaître sur la route ou dans les champs une colonne de poussière qui se déplace en tournant dans un sens ou dans l'autre pour disparaître aussi subitement qu'elle était apparue. C'est une trombe ou tourbillon de poussière, provoquée par un mouvement en spirale de l'air. Des morceaux de papier, des fétus de paille, des rameaux, des feuilles sont soulevés par cette trombe à une grande hauteur, puis retombent.



Fig. 90. Commencement d'une tempête de poussière en Australie occidentale.

Dans les déserts et dans les steppes, ces tourbillons sont très fréquents, ils maintiennent dans l'air une fine poussière qu'ils arrachent au sol. Cette poussière flotte dans l'air des journées entières, jusqu'à ce que la pluie ne la rabatte sur la terre.

Le vent transporte les grains de poussière et de sable à de très grandes distances et en forme des dépôts qui méritent une plus ample connaissance, car certains d'entre eux sont utiles, d'autres nuisibles.

Les amas de sable. Rendons-nous tout d'abord sur une côte plate de la mer ou d'un grand lac, formée du sable rejeté par

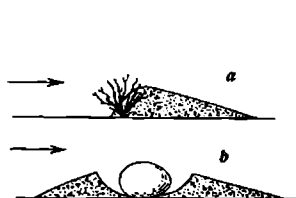


Fig. 91. Formation du monticule de sable derrière un buisson (a), derrière et devant une pierre (b).

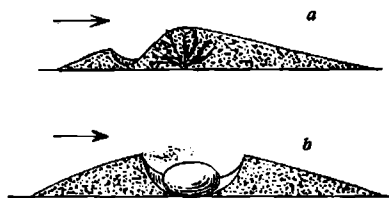


Fig. 92. Croissance du monticule (a) et disparition de l'obstacle enseveli (b).

le ressac. Ce sable est friable, ses grains ne sont pas liés entre eux et il présentera, une fois sec, un matériau de choix pour être transporté par les vents. Ceux-ci sont fréquents au bord de la mer, atteignent souvent une grande force et soulèvent les grains de sable, ou les roulent sur le sol jusqu'au premier obstacle qui arrête leur mouvement, par exemple, un buisson croissant sur la plage. Le souffle du vent s'affaiblit dans ses rameaux et les grains de sable retombent derrière lui. Peu à peu un monticule se forme derrière le buisson, semblable à un talus en pente douce qui s'aminuit et se confond avec le sable environnant (fig. 91, a).

L'influence d'une grosse pierre sera toute autre. C'est là un obstacle compact et non pas en claire voie comme l'arbuste qui laissait passer le courant de l'air, quoiqu'en le ralentissant. La couche inférieure de l'air repoussée en arrière par la pierre perd sa force et abandonne les grains de sable devant la pierre, formant une langue de sable en pente tournée contre le vent (fig. 91, b). Mais une partie du courant aérien affleure la pierre par le haut et les côtés et dépose les grains de poussière dans la zone calme derrière la pierre. Ainsi deux flèches de sable se constituent autour

d'elle, devant et derrière. Mais le buisson et la pierre ne sont que des obstacles momentanés. Quand le buisson tout entier sera couvert par le sable, il deviendra un obstacle compact et le sable commencera à s'accumuler sur sa face tournée vers le vent (fig. 92, a). Quand le tas de sable devant la pierre aura atteint la hauteur de celle-ci, les espaces vides entre eux se combleront et un talus se formera des deux côtés comme autour du buisson (fig. 92, b).

L'accumulation du sable suivra ensuite la même voie dans les deux cas. Le talus s'accroît surtout du côté tourné vers le vent où les grains de sable s'amassent; mais, en partie, ces grains atteignent le sommet et à l'abri du tas de sable roulent sur le côté d'éboulement. Ainsi se forme un tertre typique, à pente douce vers le vent, à pente raide



Fig. 93. Transformation du monticule en dune.

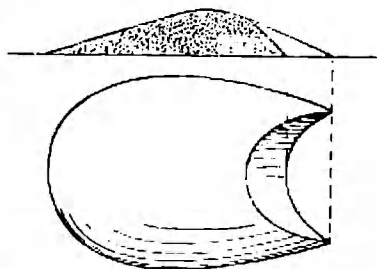


Fig. 94. Plan et coupe d'une dune.

sur le côté opposé et à la crête aiguë (fig. 93). Mais les grains de sable issus de la partie inférieure de la pente devancent ceux qui gravissent la crête; ils s'avancent plus loin en formant de petites flèches qui du côté d'éboulement suivent la direction du vent. Vu du dessus, le monticule a la forme indiquée sur la figure 94, avec deux cornes du côté opposé au vent. C'est la forme typique des monticules formés par le vent autour d'un obstacle; elle rappelle celle de la phalange unguéale du cheval.

C'est exactement de cette même façon que s'accumule le sable dans le désert, et le monticule, adoptant la forme caractéristique décrite plus haut, s'y appelle barkhane (fig. 95).

La formation des dunes. Au bord de la mer un tel monticule ne peut rester longtemps solitaire. La mer apporte perpétuellement du sable, le vent le déplace vers l'intérieur de la côté, les obstacles sont nombreux et bientôt les collines de sable commencent à s'unir avec leurs voisins de droite et de gauche. Une chaîne de monticules se forme à une certaine distance du bord et parallèlement à ce dernier. Elle est appelée dune. Elle descend en pente douce



Fig. 95. Grandes barkhanes de sables mouvants près de la ville de Tsing-pan dans l'Ordos sud, Chine.

vers la mer et les grains de sable qui franchissent sa crête roulent sur sa pente plus raide tournée vers la terre ferme. En coupe longitudinale elle présente une série de sommets plats qui correspondent aux monticules initiaux, séparés par des creux qui correspondent aux endroits où les monticules se sont joints (fig. 96 et 97).

Le mouvement des dunes. La dune la plus proche de la mer est appelée dune avancée. Elle n'est pas immobile: le sable franchit constamment sa crête et la dune chemine très lentement, pendant des dizaines d'années, vers l'intérieur des terres. Quand elle s'est déplacée suffisamment loin, une nouvelle dune surgit à son ancien emplacement. La précédente continue à se déplacer sur la terre ferme, et la dune nouvelle avancée la suit. Ainsi, pendant des siècles, des rangs de dunes se forment, au nombre de cinq, dix et plus.

La hauteur des dunes et leur nombre dépendent de l'abondance du sable rejeté par la mer, de la force et de la constance des vents. Leur hauteur varie de 20 à 30 mètres sur les bords de la Baltique, jusqu'à 50 à 100 mètres sur le littoral atlantique de la France et de 155 à 200 mètres sur les côtes de la Méditerranée. La vitesse de déplacement des petites dunes isolées peut atteindre deux ou trois mètres par jour pendant les tempêtes; les grandes dunes franchissent de un à vingt mètres par an. En cheminant plus loin sur ces terres, les dunes ensevelissent les forêts, les prés, les labours, les villages. Après un certain nombre d'années, les forêts sont évidemment perdues et les villages en ruines réapparaissent quand les dunes ont changé de place. On trouve sur les côtes de



Fig. 96. Plage de la Baltique près de la ville de Svétlogorsk.
Versant exposé au vent de la dune avancée.



Fig. 97. Crête de la dune avancée, plantée de buissons, près de
Svétlogorsk.



Fig. 98. Avance des sables mouvants des barkhanes sur l'oasis Daclo, Sahara.

la Baltique, de la mer du Nord et de l'océan Atlantique de nombreux exemples de forêts mortes et d'habitations détruites. C'est pourquoi on tente d'arrêter l'avance des dunes. On plante pour cela sur les plages où s'exerce l'action du vent des herbes et des buissons, si cette plage n'est pas couverte par l'eau de mer pendant les tempêtes, ainsi que sur le flanc de la dune la plus avancée du côté du vent. La crête de cette dernière, la pente raide et les dunes suivantes sont fixées à l'aide d'herbes tout d'abord, puis par des plantations de pins de diverses espèces qui aiment les terrains sablonneux. On arrive ainsi à transformer peu à peu les chaînes de dunes en forêts et à arrêter complètement leur mouvement. Ce n'est que sur la plage et sur la pente orientée vers le vent de la dune avancée que la lutte de l'homme avec les forces de la nature ne cesse pas. Pendant les tempêtes, le ressac détruit les plantations, le vent les arrache, il faut constamment réparer ce qui a été détérioré, raffermir la berge (fig. 97 et 99).

Dans leur avancement les dunes barrent souvent les rivières qui se jettent dans la mer les forçant à former des lacs et transformant la région en marécage, comme le montre la figure 100 où se trouve le plan de la dune de Cazaux en France.

Les dunes lacustres et fluviales. Quand les bords d'un grand lac sont plats sur une étendue considérable et que les vents soufflent

surtout en direction de la terre, des dunes se forment également mais elles n'atteignent pas les dimensions des dunes maritimes et se prêtent mieux à la fixation. De même, sur les rives plates et dans les bras des cours d'eau sur lesquels des bancs de sable et de limon apparaissent par temps sec, le vent forme des dunes isolées ou des chaînes de dunes, qui se déplacent également dans le sens du vent en couvrant les forêts, les labours, les villages; on lutte contre elles en les fixant. Dans la partie européenne de l'U.R.S.S., on trouve des dunes fluviatiles dans les cours inférieurs du Dniepr, de la Volga, de l'Oural, et en Sibérie sur les bords de l'Irtyche, de l'Obi, de la Sélanga, de la Tchikoï, de la Léna.

Les dunes du désert. Dans le désert, le vent trouve un autre matériau pour la formation des sables mouvants. Ce matériau est dû à l'érosion de roches sédimentaires telles que le grès ou de roches éruptives aussi répandues que le granit. Dans le processus de l'érosion, ils se décomposent en gravier et en sable. Il y a de plus dans les déserts beaucoup d'alluvions meubles, provenant des rivières qui tarissent après les crues et des torrents temporaires, qui se forment dans les montagnes pendant les pluies et apportent avec le cailloutis et les galets beaucoup de limon et de sable dans les plaines environnantes, où ce matériau sèche vite.



Fig. 99. Dune avancée couverte d'un bois à l'ouest de la Narva, sur la côte du golfe de Finlande.

Dans le désert, le vent n'est pas un hôte d'occasion, il est le maître. Dès le lever du soleil un vent léger se lève habituellement, qui prenant peu à peu de la force atteint dans l'après-midi son point culminant, pour tomber vers le soir et cesser tout à fait la nuit. A part ces vents réguliers, des tempêtes surviennent, qui font rage pendant une journée et une nuit entière ou, parfois survenant subitement, cessent tout aussi brusquement.

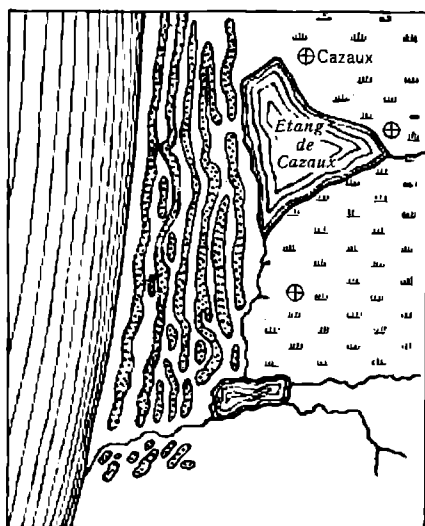


Fig. 100. Plan des dunes de Cazaux sur le littoral ouest de la France.

Là où il y a beaucoup de matériau léger et peu de végétation, le vent soulève les grains de sable et les transporte jusqu'au premier obstacle venu. Ce sont, comme sur le bord de la mer, des arbustes isolés, des pierres, des rochers isolés, des collines ou des chaînes de montagnes. Devant les buissons, devant et derrière les pierres le sable apporté par le vent produit des talus semblables à ceux que nous avons vus sur le bord de la mer. Ces talus, de façon absolument identique, se transforment en collines de sable de forme caractéristique, avec deux cornes et un versant à pente douce, l'autre à pente raide (fig. 93 et 94). Les populations turques qui vivent dans le désert appellent ces dunes "barkhanes" (fig. 95).

Ce terme a également été adopté par la science. Les dunes du désert ou barkhanes sont des amas de sable vagabond produits par l'érosion éolienne, ce qui les distingue des dunes dont le sable a été apporté par l'eau des mers, des lacs et des rivières.

Si le matériau fournissant la matière pour les dunes du désert est peu abondant, celles-ci restent isolées et progressent rapidement dans la direction du vent dominant. Si les quantités de sable sont suffisantes, les dunes du désert qui se sont développées près des obstacles isolés s'accroissent en dimensions et s'unissent, comme les dunes marines, en formant des chaînes.

Dans ces chaînes, la crête est toujours ondulée tant dans le sens horizontal que dans le sens vertical; ses sommets correspondent aux sommets des collines initiales, ses creux, qui s'avancent habituellement par rapport aux sommets, correspondent aux cornes des dunes isolées qui se sont réunies.

Les barkhanes couvrent dans les déserts des superficies plus ou moins considérables, atteignant des centaines et des milliers de kilomètres carrés. Ils se suivent par vagues réunies entre elles par des crêtes de sable, ce qui fait que les intervalles entre les vagues de dunes sont des séries de creux. On en trouve dans les déserts du Kara-Koum, du Kysyl-Koum et bien d'autres en Asie centrale, les déserts de l'Alachagne, de la Mongolie orientale et du bassin du Tarim, ainsi que dans les déserts du Sahara, de l'Arabie, de l'Australie, etc.

La hauteur des dunes du désert varie de 15 à 20 mètres, mais dans certaines régions, par suite de conditions particulières — abondance du sable et accumulation de celui-ci autour de grands obstacles durant des siècles — elles peuvent atteindre 100 ou 200 mètres de hauteur, formant de véritables montagnes. Ainsi, par exemple, les sables du désert immense de Takla-Makan dans le Turkestan chinois et les sables de Koum-Tagh au pied du Tian-Chan oriental entre les villes de Liouktchoun et Pitchan et dans différentes parties du Sahara (fig. 101).

Les obstacles que présentent les groupes et les chaînes de collines sont la cause d'une accumulation moins régulière des sables du désert. On y trouve des dunes isolées, des chaînes de différente longueur et de formes variées, allongées dans les vallées et dans les creux adossés aux versants, les gravissant et les franchissant.

Certaines dunes de dimensions particulièrement réduites se déplacent rapidement dans la direction des vents dominants; les



Fig. 101. Dunes du Sahara près de l'Egypte. On voit sur le flanc des dunes les ondulations du sable.

petites franchissent par an de 100 à 200 mètres et les grandes de 30 à 40 mètres. Les sables du désert avancent très lentement précédés en guise d'avant-garde de dunes isolées dérivées des sables que le vent emprunte à la chaîne principale. Ces avant-gardes, augmentant en nombre et s'unissant en groupes de deux ou trois dunes, envahissent de nouveaux territoires, et le gros des sables les suivent pas à pas.

On peut observer de ces invasions par le sable d'espaces autrefois occupés par la steppe, des surfaces cultivées ou des habitations en Turkménie, en Ouzbékistan, en Kara-Kalpakie, dans le Kazakhstan, dans le bassin de Tarim et dans l'Ordos en Asie centrale aux confins des sables mouvants. Le cultivateur isolé n'est pas à même de lutter contre l'invasion des sables. La limite de la surface ensablée se trouve habituellement à un kilomètre environ de son champ, de son jardin ou de sa maison ; mais pendant les vents violents il commence à remarquer que le sable s'accumule derrière les buissons, dans les sillons des labours, dans le fossé le long des routes, à l'abri des haies. Les tas de sable tout petits au début augmentent avec chaque tempête en nombre et en dimensions, le sol devient de plus en plus sablonneux. Au bout de quelques années, les amas de sable deviennent apparents : les

petits talus sont devenus des dunes, la fertilité des champs baisse. Encore une dizaine d'années et le sable commence à assaillir l'homme lui-même : les labours ont presque disparu sous les dunes que l'on peut voir parmi les arbres fruitiers, le long des murs et des haies, et qui escaladent les clôtures, montent jusqu'au toit, couvrent une partie de la cour. Dans un an ou deux, l'homme en sera réduit à abandonner son champ et sa maison. Seuls les efforts collectifs et l'aide de l'Etat permettent d'arrêter le mouvement des sables, en les fixant par des plantations d'arbres et d'arbustes, comme c'est le cas pour les dunes maritimes.

Il ne faut pas croire que les dunes du désert sont partout dépourvues de végétation. Il n'y a que très peu de déserts de sable complètement privés de plantes : ce sont notamment des grandes étendues au Sahara, en Arabie, dans le désert de Takla-Makan, certaines régions du Kara-Koum et du Kysyl-Koum. Mais souvent on peut voir entre les dunes des herbes et des buissons, grimpant même, par endroits, sur les versants. Quand cette végétation est abondante, les formes même des dunes du désert se modifient, les crêtes s'arrondissent, les flancs abrupts deviennent plus doux, car les herbes et les buissons retiennent le sable. Ces sables à moitié couverts de plantes sont appelés mamelonnés parce qu'ils n'ont déjà plus la forme de barkhanes, mais de mamelons.

L'homme qui coupe ou arrache les plantes et les utilise comme combustible, les animaux qui mangent et piétinent l'herbe, sont les principaux destructeurs de la végétation des sables et aident à la reconstitution des dunes et à leur expansion. Partout dans les sables mamelonnés où vivaient autrefois les éleveurs de bétail nomades, le sable se dénudait autour des habitations et des puits et se transformait en dunes. Certains rongeurs portent également préjudice à la végétation des déserts. Ce sont les zisels et les rats des sables qui vivent en grandes quantités dans certaines dépressions. Ils détériorent, en creusant leurs terriers, les racines des plantes et fournissent au vent un matériau facile à transporter en rejetant le sable de leurs galeries. Les creux où se sont établies des colonies de ces animaux sont particulièrement dénudés et leur végétation est chétive et déperissante.

Les rides. La pente vers le vent des dunes est toujours couverte de légères inégalités sous forme de bourrelets séparés par des sillons et dont l'ensemble constitue ce qu'on appelle des rides. Elles sont formées par les vents légers ne charriant les grains qu'à de petites

distances. Si nous les examinons attentivement, nous verrons les grains les plus fins, réunis sur les bourrelets, et les grains plus gros emplissant les creux. Ainsi donc, le vent trie les grains de sable suivant leur taille. Les bourrelets ne sont, somme toute, que des chaînes de dunes en miniature. Les rides changent souvent d'orientation, car elles se disposent toujours perpendiculairement à la direction du vent (fig. 101).

Les galets à facettes. Les grains de sable, que le vent transporte en grandes quantités, sont pour la plupart de quartz dur. En heurtant contre le cailloutis, les galets et les rochers et en coulant sur leur surface, ils les burinent et les façonnent. On peut voir

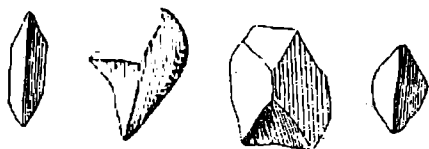


Fig. 102. Galets à facettes polis par le sable.

de ce cailloutis et de ces galets dans tous les endroits du désert où les rochers voisinent avec des espaces ensablés.

Les effets de ce travail varient suivant la dureté des roches : moins elles sont dures, et plus leur usure est rapide ; les pierres dures, par contre, ne sont que polies par le sable. Les roches hétérogènes acquièrent une surface irrégulière : les parties plus dures forment des excroissances, des saillies, les endroits plus tendres sont creusés et forment des cavités. Les éclats de roche, les galets qui demeurent longtemps sur le sable dans la même position, s'usent de tous côtés mais à un degré différent, suivant la fréquence et la force des vents. C'est pourquoi on peut trouver dans le désert des trièdres et des tétraèdres très intéressants, aux facettes polies et luisantes et aux arêtes plus ou moins aiguës (fig. 102).

Les tas de sable. Dans les régions où le sable libre est trop rare pour pouvoir former des dunes rapidement et où la végétation, assez dense, lutte efficacement contre l'ensablement, on trouve des amas de sable sous forme de tas et de monticules de diverse grandeur. La forme et la dimension de ces derniers dépendent du caractère de la végétation. Les petits buissons aux rameaux rares et minces provoquent la formation de tas de 50 centimètres à un

mètre de haut qui rappellent les tertres funéraires. Les buissons touffus, comme le tamarix par exemple, qui croissent souvent en groupes, donnent naissance à des tas et même des monticules de 3 à 5 mètres de hauteur, rappelant les tumulus. Des amoncellements plats apparaissent autour des roseaux poussant près des sources. Le *stipa splendens* aux touffes en gerbes est accompagné de tas en forme de mottes (fig. 103 et 104).

Les plantes résistent à l'ensablement jusqu'à un certain point. Quand le tas de type donné devient assez grand, le buisson périt peu à peu, car ses racines n'atteignent plus les eaux souterraines. Il sèche, le vent brise et emporte ses feuilles et ses rameaux, puis ses branches. Le tas de sable, privé de sa défense, se disperse. Le vent emporte ses grains vers les amoncellements encore existants. Ce qui détermine la hauteur des différents amas de sable, c'est donc le caractère de la plante qui lui sert d'appui. Les sables de tamarix, surtout répandus dans les terrains salifères et sur les bords des cours d'eau, disparaissent lorsque la rivière change de lit. Privés d'eau, les arbustes périssent et les tas de sable sont dispersés (fig. 105).

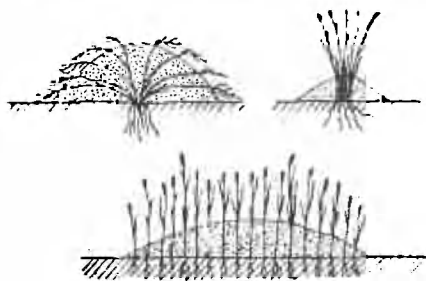


Fig. 103. Types d'amas de sables auprès d'un buisson, d'une touffe d'herbe et des roseaux.

Le transport de la poussière. Nous savons que dans les déserts, les amas de sable se forment là où l'érosion produit assez de matériaux : débris de roches locales ou dépôts desséchés des cours d'eau et des torrents temporaires. Mais en plus des grains de sable, l'érosion produit un matériau plus fin encore — les grains de poussière. Nous connaissons aussi les tempêtes de poussière, qui ne se produisent pas seulement dans les déserts, les trombes ou tourbillons, qui se déplacent pendant les jours chauds à travers les labours, les steppes, les routes en soulevant de la poussière. Qu'advient-il de cette poussière ? Si elle restait toujours suspendue dans l'air, ce dernier aurait depuis longtemps perdu sa limpidité et nous vivrions dans un épais brouillard de poussière.

La poussière est le produit le plus fin de l'érosion des roches. Elle flotte dans l'air plus ou moins longtemps, transportée par

le vent à de grandes distances, mais finit tout de même par s'abattre sur la terre, surtout sous l'action de la pluie et de la neige. Vous avez bien certainement remarqué qu'après la pluie ou la neige l'air est très limpide, pur, transparent, on voit mieux et plus loin. Cela s'explique par le fait qu'elles en éliminent la poussière qui, bien qu'imperceptible à l'œil, atténue la transparence de l'air (on s'en aperçoit d'ailleurs en regardant les objets éloignés).

Nous observons quotidiennement que la poussière se dépose, tant en ville que dans les campagnes, pénétrant de l'extérieur avec l'air et se déposant sur tous les objets en une mince couche. Si l'on n'époussette pas de temps en temps, la couche de poussière devient apparente et il serait impossible de prendre quoique ce soit dans ses mains sans les salir. Mais cette poussière qui se dépose partout, sur la terre et sur les mers, rejoint le sol, est entraînée par l'eau courante, s'en dégage avec les autres matériaux et ne forme pas de dépôts indépendants.

Les dépôts de poussière (le lœss) apportée par le vent se forment dans d'autres conditions. Les déserts, où, par suite de la pauvreté de la couverture végétale et des brusques écarts de



Fig. 104. Tumulus de sable couvert de tamarix. Désert des confins de la Dzungarie.

température, l'érosion est particulièrement forte, sont de véritables "fabriques" à produire des quantités de matériaux fins — grains de sable et de poussière. Les vents sont aussi très fréquents dans les déserts. Les jours de calme plat y sont extrêmement rares. Nous en avons d'ailleurs déjà parlé, en mentionnant les trombes qui surviennent constamment de-ci de-là et aspirent la poussière de la terre en l'élevant à une hauteur considérable. C'est pourquoi dans les déserts l'air est moins limpide que dans les pays au climat plus humide dont la végétation plus épaisse défend le sol contre l'action du vent.

Ces vents ont une direction généralement centrifuge, s'est-à-dire dirigée du centre vers l'extérieur. Ce sont eux qui nettoient les déserts en évacuant les produits de l'érosion vers leurs confins. Sans les vents, toutes les collines et les montagnes des déserts seraient ensevelies sous ces produits. Les affleurements de roches y sont cependant beaucoup plus fréquents que dans les pays au climat humide; le voyageur en rencontre partout sur les versants des collines et des montagnes, souvent même dans les creux et les fonds des vallées. Il est vrai que ces roches sont fendillées, réduites en éclats, en débris, en cailloutis, mais elles ne sont pas couvertes de cette couche de terre meuble, qui, dans les pays humides, cache le plus souvent les roches originales, qui n'affleurent qu'assez rarement et surtout sous l'action de l'eau courante. Dans les déserts les éluvions font défaut ou forment une couche très mince et sont de composition grossière, les déluvions ne s'amassant qu'au pied des versants.

Nous savons déjà que dans les déserts les produits de l'érosion forment les barkhanes. Mais ceux-ci sont loin d'en couvrir toute la superficie. Ils sont surtout développés aux confins, devenant bien plus rares dans les régions intérieures: généralement, ils apparaissent là où les processus d'érosion produisent des matériaux en quantités particulièrement grandes ou bien là où les obstacles sont plus nombreux qu'ailleurs et empêchent ces matériaux de se déplacer. La masse principale des grains de sable et de poussière est évacuée des parties intérieures des déserts vers les confins où les particules les plus grosses se déposent tout d'abord; ce sont les grains de sable qui en s'accumulant forment de grandes étendues



Fig. 105. Dispersion des tas de sable autour des tamarix.

de ces barkhanes. Les particules plus fines — les grains de poussière — sont emportées encore plus loin, au-delà des limites du désert, là où croît la végétation grâce à un climat moins sec dû à des pluies plus fréquentes et où les vents du désert se heurtent aux vents venus d'autres points de l'horizon et, perdant finalement toute leur force, leur permettent de se déposer.

La formation du lœss. Cette poussière emportée par les vents du désert et s'accumulant peu à peu, forme des couches plus ou moins épaisses d'une terre particulière, que l'on appelle terre jaune (jeltoziom) ou lœss.

Cette terre est de couleur gris-jaune ou brun-jaune; elle se coupe facilement au couteau, s'effrite entre les doigts, mais elle est ce-



Fig. 106. Poupées calcaires du lœss.

pendant suffisamment ferme, visqueuse, pour former des falaises abruptes, hautes parfois de 10 à 20 mètres. Elle comprend beaucoup de cavités minuscules, dont il est facile de déceler la présence, en jetant un bâtonnet de lœss dans un verre d'eau: pendant un certain temps des bulles d'air se dégageront, chassées par l'eau qui pénètre dans le lœss. Outre ces pores imperceptibles à l'œil nu, on voit encore dans le lœss une

sorte de petits canaux qu'y laissent les racines des végétaux. Le lœss est constitué de petits grains de poussière et de sable, qui sont des particules de quartz, de feldspath, d'argile, de calcaire, de minuscules paillettes de mica, fortement coagulées. Il forme avec l'eau une boue épaisse et gluante et, sur les routes, sous les roues des véhicules et les sabots des animaux, se transforme en fine poussière. C'est pourquoi les routes traversant le lœss sont très poudreuses par temps sec: les pieds y soulèvent des nuages de poussière; et elles sont boueuses par temps de pluie: une boue épaisse s'attache alors aux chaussures.

Constitué de sable fin et de poussière, le lœss — fait caractéristique — ne se répartit pas en couches, comme les sédiments déposés dans l'eau, mais forme une masse compacte. Le lœss contient du calcaire. En effet, on peut souvent voir dans les coupes de lœss des concrétions calcaires isolées ou formant des couches entières qui, par leur forme ronde ou allongée, rappellent les racines de raifort, et qu'on appelle poupées calcaires (fig. 106).

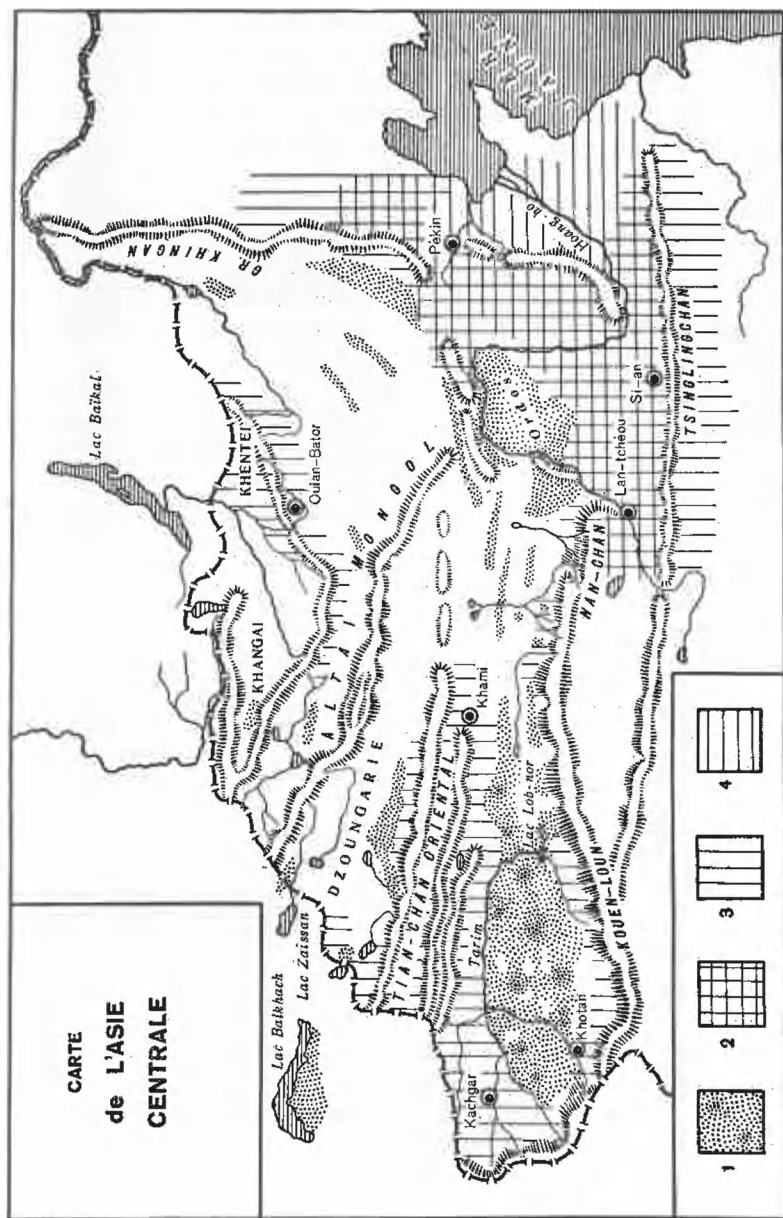


Fig. 107. Carte de l'Asie centrale. Surfaces occupées par les sables mouvants et le loess :

1 — sables, 2 — couches très épaisses de loess, 3 — loess de peu d'épaisseur, 4 — loess schisteux, redéposé par les fleuves, alternant avec des couches de loess non schisteux.

Toutes les propriétés du loess s'expliquent par sa provenance de la poussière apportée par les vents du désert. Cette poussière se dépose dans les steppes bordant le désert. La steppe est couverte d'herbes plus ou moins touffues, de petits buissons d'absinthe et la poussière se colle à leurs tiges et à leurs feuilles. Après avoir fait quelques pas dans cette steppe vous verrez vos chaussures se couvrir d'une poussière jaunâtre. La brise fait tomber sur le sol la poussière des plantes et la pluie en lave les herbes, les grains de poussière se collent donc définitivement au sol. Ainsi, très lentement, la couche de terre poussiéreuse s'accroît d'un ou deux millimètres par an peut-être, mais durant les millénaires elle forme des couches de 10, 20, même 100 mètres et plus, si les conditions restent les mêmes (fig. 110).

Une des particularités caractéristiques du loess — sa très faible teneur en humus — s'explique par le climat sec des steppes où la poussière se dépose; les débris des plantes ne s'incorporent pas à la terre, mais se pulvérisent peu à peu et sont emportés par le vent; seules les racines se décomposent dans le sol. Malgré cela, le loess est très fertile, grâce à sa porosité, permettant à l'air d'atteindre les racines ainsi qu'à sa forte teneur en sels solubles, indispensables à la croissance des plantes.

La Chine, pays du loess. Le loess se forme à l'heure actuelle dans les pays où existent des déserts suffisamment étendus pour produire une grande quantité de poussière, et à leurs confins — des steppes, où cette poussière peut s'accumuler. L'exemple contemporain le plus marquant est l'Asie centrale en tant que "fabrique" de poussière et la Chine septentrionale en tant que région de dépôt du loess.

Jetons un coup d'œil sur la carte de l'Asie centrale (fig. 107). Les déserts y occupent une surface considérable: le Gobi en Mongolie orientale et centrale, prolongé à l'ouest par le désert de Khami (Pé-Chan), au sud de la chaîne de montagnes du Tian-Chan oriental, et par le désert de Dzoungarie, au nord. Ces déserts sont les "fabriques" d'où les sables et les poussières sont transportés vers leurs confins. Les sables occupent de grandes étendues: à l'est, au pied du Grand Khingan; au sud, dans l'Ordos, le long du Hoang-ho et dans l'Ala-Chan; au sud-ouest, dans le bassin du Tarim (Takla-Makan) et au nord-ouest, les sables de Ko-pé. A part ces grands espaces, il y en a également de plus réduits dans le Gobi même, mais la concentration des sables mouvants aux limites des déserts est évidente, surtout en ce qui concerne le sud-est, le sud et le sud-



Fig. 108. Terrasses artificielles dans le loess. Province Chan-si, Chine septentrionale. Vue à vol d'oiseau.

ouest. Les régions de sable sont suivies de régions de loess. La plus importante occupe la Chine du Nord : les provinces de Ho-pé, Chan-si, Chen-si et Kan-sou, où le loess couvre les montagnes, les plateaux et les vallées d'une couche épaisse dépassant partout cent mètres et atteignant parfois deux cents et même trois cents mètres. C'est le pays typique du loess, où les couches originelles n'apparaissent à la surface que dans les montagnes les plus élevées et par endroits dans les vallées des fleuves les plus importants, surtout dans la vallée large et profonde du Hoang-ho. La couche de loess est déjà fortement entaillée par les ravins et les vallées (fig. 108), mais sur leurs flancs on voit des couches plus anciennes de ce même loess. Dans ce pays le loess met son empreinte sur la vie de toute la population : on en fait des briques en terre battue ou cuite pour demeures ; dans les coupes de loess, on creuse des cavernes d'habitation qui forment des villages entiers (fig. 109). Ces villages sont faciles à creuser, grâce à la mollesse du loess, et assurant plus de chaleur en hiver et plus de fraîcheur en été que les maisons ; toutes les céréales et tous les légumes croissent sur le loess ; toutes les routes sont établies dans le loess et sur le loess ! La couleur jaune règne sur la terre et dans l'air, riche de poussière de loess. C'était autrefois la couleur "sacrée" de la Chine.



Fig. 109. Affleurements de loess avec les cavernes d'habitation. Province Chan-si, Chine septentrionale.

Cette région principale du loess touche aux sables de l'Ala-Chan, d'Ordos, du Hoang-ho et de la Mongolie orientale; en direction de ces sables, le loess devient peu à peu sablonneux. C'est la région des steppes sèches, où se dépose la poussière chassée par les vents dominants vers le sud-est du désert. Le loess escalade également le versant nord de la chaîne montagneuse du Kouen-Loun oriental, qui délimite cette région du loess au sud. Cette chaîne une fois franchie, en Chine méridionale, le climat est tout autre, très humide et le sol y est différent. A l'est, la basse contrée de la Grande Plaine Chinoise est également couverte de loess, mais lavé, transporté et déposé par le Hoang-ho et autres cours d'eau, descendant de la région montagneuse couverte de loess qu'ils entraînent.

Plus à l'est, le loess couvre les contreforts et le versant nord des chaînes montagneuses du Nan-Chan et du Kouen-Loun occidental, les contreforts orientaux du Pamir, ceux du sud du Tian-Chan oriental. Les surfaces qu'il occupe ici sont moindres et moindre est son épaisseur. Il n'y a pas et il n'y a pas eu ici de larges prairies où le loess aurait pu se déposer, comme en Chine septentrionale. Il se déposait sur les versants des montagnes que les pluies lavaient souvent. Mais ici également la région du loess borde la large étendue



Fig. 110. Abrupt de loess dans la vallée de la rivière Angren.

de sable du Takla-Makan. Sa grande surface et la hauteur de ses dunes, qui atteignent 200 mètres, résultent du fait que cette région — le Turkestan chinois — est encerclée par les montagnes au sud, à l'ouest et au nord et a la forme d'un sac où les vents de l'Est apportaient des quantités énormes de sable et de poussière.

Il y a très peu de sables aux confins nord de l'Asie centrale, mais le loëss, quoiqu'en couche assez mince, y existe. Il n'y avait pas à cet endroit de grandes steppes sèches, les plateaux Khangai et Khentéi sont couverts de forêts, les conditions étaient donc différentes. De plus, les vents soufflent rarement de l'Asie centrale vers le nord. Ce n'est que dans la Dzoungarie que nous trouvons de nouveau les grands sables de Ko-pé et, au-delà, près des frontières de l'U.R.S.S., du loëss en couches minces. De ce côté la poussière était emportée par les vents à de très grandes distances et s'éparpillait sur une grande surface.

Nous voyons donc une liaison constante entre les régions de sables mouvants et les déserts en tant que "fabriques" de sable et de poussière et les régions de dépôt où se forme le loëss. Toutes les particularités, toutes les distinctions que nous remarquons dans les différentes parties des confins de l'Asie centrale en ce qui concerne la répartition du sable et de la poussière et l'épaisseur de leurs couches, s'expliquent par les particularités locales de climat, de végétation, de relief et d'orientation des vents.

L'Asie centrale est encore à l'heure actuelle une "fabrique" de sable et de poussière, et ses confins, une zone d'accumulation de loëss. Mais dans un passé récent, durant la première moitié de la période géologique actuelle, les conditions de formation et de dépôt des sables et des poussières étaient encore plus prononcées par suite du climat des époques glaciaires, dont nous parlerons dans le chapitre suivant.

Les autres déserts de la Terre sont aussi des "fabriques" de sable et de poussière, mais les lois qui y régissent la répartition des zones d'entraînement et de dépôt ne sont pas si nettes, car les conditions climatiques et la situation de ces déserts sont autres. Ce n'est qu'en Asie qu'ils occupent le centre d'un grand continent et l'influence des mers et des vents y joue un rôle moins grand qu'en Afrique et en Arabie.

Le loëss de l'Ukraine. Le lecteur, qui sait que le loëss constitue le sol d'une partie considérable de l'Ukraine, est en droit de demander: quel est donc le désert qui a fourni la poussière dont est fait le loëss ukrainien? Peut-être ce loëss a-t-il une origine autre que le

loess asiatique? Non, c'est un sol également constitué par de la poussière, mais le désert qui a été la "fabrique" de cette poussière a disparu. La différence existant entre le loess de la Chine et celui de l'Ukraine consiste en ce que le premier peut être également de formation contemporaine, tandis que le second est un loess fossile qui s'est formé autrefois et est recouvert actuellement par une couche de terre noire. Nous apprendrons dans le chapitre suivant où se trouvait le désert d'où est venu le loess ukrainien et pourquoi il a disparu.

Nous voyons donc que les déserts, en tant que "fabriques" de poussière servant à former un sol fertile, jouent dans la nature un rôle important et utile pour l'homme. Mais nous savons, d'autre part, que ces mêmes déserts sont des "fabriques" produisant les sables qui, s'amassant en quantités énormes à leurs confins, empiètent sur les steppes, les champs cultivés, les habitations des hommes et les détruisent. Par conséquent, les déserts causent aussi de grands dommages. Cependant, si nous pesons le pour et le contre, le préjudice causé sur une étroite bande de territoire à la limite des sables est bien moins important que les avantages résultant de la fertilisation de superficies étendues de terrains. On peut, d'ailleurs, lutter contre les méfaits du désert en fixant les sables mouvants par des plantations d'arbres qui transformeront en fin de compte ces sables en terrains cultivables.

Les types de déserts. Nous nous sommes beaucoup étendus sur les déserts, "fabriques" de poussière, de sable et berceaux des vents centrifuges, mais nous n'avons pas fait jusqu'ici avec eux assez ample connaissance. Etant donné que la description des déserts est une tâche incombant à la géographie physique, nous nous bornerons à donner une brève description des types essentiels de déserts. Suivant la forme du relief et la composition du sol, on distingue les types suivants: 1) montagneux, 2) pierreux, 3) sablonneux et 4) argileux.

Les déserts montagneux ont un relief irrégulier présentant une succession de chaînes et de groupes de montagnes habituellement peu élevées, suivis de collines avec des vallées et des dépressions plus ou moins larges (fig. 111). Les chaînes ont des formes accidentées à arêtes vives, les cimes et les crêtes sont aiguës, les versants raides, les rochers et les affleurements de roches dures abondent. Ces dernières sont fortement crevassées par suite de l'érosion mécanique et peuvent facilement être séparées en morceaux avec les mains. Dans les roches à gros grains, on voit souvent des poches,



Fig. 111. Désert vallonné de calcaires de l'éocène, bordant la vallée du Nil près de Héliouan. On voit au loin les lits de cours d'eau à sec.

des niches, des galeries, des alvéoles, semblables à celles qui sont décrites au chapitre IV. Des versants tout entiers, composés de granits ou de grès, sont parfois couverts de ces creux et rappellent la surface du bois piqué de vers ou un morceau de fromage de gruyère.

Mais souvent une partie plus ou moins grande des versants est complètement couverte d'éclats et de gravier provenant des roches désagrégées. Ces éboulis sont particulièrement abondants sur les versants des collines, c'est-à-dire sur les formes de relief plus basses, où il n'y a parfois pas d'affleurement, — tout est déjà détruit, émietté, — alors que dans les montagnes plus hautes les affleurements dominant ou sont tout au moins fréquents. En certaines conditions ces derniers, ainsi que les produits de l'érosion, sont couverts du vernis du désert et semblent coulés en fonte brillante ou faits de morceaux de fonte.

Les chaînes et groupes de montagnes sont coupés de nombreuses vallées et de dépressions qui forment parfois des chapelets et des labyrinthes. Leur fond est couvert d'un apport grossier où fin de gravier, de sable ou d'argile où sont creusés les lits de torrents temporaires, qui, de temps en temps, après une forte pluie, entraînent ces matériaux des montagnes vers les vallées principales ou les plaines. Le matériau fin est constamment emporté des versants

et des rochers par les vents, qui, comme les pluies, contribuent à ce que les montagnes désertiques ne soient pas ensevelies sous les produits de leur destruction.

Les chaînes et groupes de montagnes s'élèvent habituellement sur un large piédestal s'abaissant en pente douce en tous sens vers les plaines et les vallées environnantes. Ces piédestaux sont formés des produits de l'érosion des montagnes, grossiers ou fins, apportés par les torrents intermittents des vallées et des gorges. Les averses, en tombant sur les flancs, fournissent brusquement une grande masse d'eau courante et des torrents tumultueux se précipitent dans toutes les vallées, entraînant le sable, l'argile, le gravier, roulant des blocs entiers. Arrivée sur le piédestal, l'eau chargée de pierres et de sable, s'écoule rapidement sur la surface plane, perd sa force et abandonne le matériau apporté, lequel forme des proluvions qui en s'accumulant peu à peu constituent le piédestal. Un trait caractéristique des montagnes désertiques est qu'elles s'élèvent brusquement au-dessus du piédestal (fig. 112, *a*), alors que pour les montagnes de climat humide, l'angle qu'elles forment avec celui-ci est adouci par les déluvions (fig. 112, *b*).

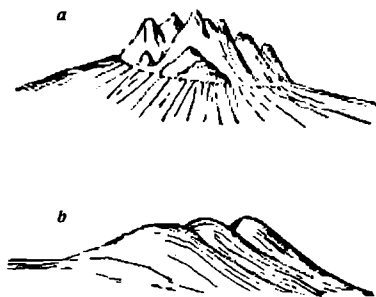


Fig. 112. Piédestal d'une chaîne montagneuse (*a*) dans le désert et dans une région à climat humide (*b*).

On ne pourrait affirmer que tout désert montagneux est complètement dépourvu de végétation. Sur le bas des versants et le long des lits des cours d'eau desséchés, dans les vallées et les dépressions, on peut toujours trouver des buissons, des arbustes isolés et, le long des lits, même des arbres. Les déserts montagneux se distinguent les uns des autres par la forme et la richesse de leur végétation. Dans certains d'entre eux les plantes sont plus abondantes, dans d'autres elles font totalement défaut ou presque.

Les grandes vallées ou les dépressions, situées entre les groupes ou les chaînes de montagnes, sont couvertes d'une couche plus ou moins importante de dépôts meubles, de gravier, de sable et d'argile apportés des montagnes et des collines. Ce sont des déserts pierreux, argileux ou sablonneux. Mais il n'est pas rare que dans ces vallées et dépressions des roches dures se présentent à l'état de saillies

fortement éoussées ou de rochers, même de monticules entiers qui montrent que l'épaisseur des alluvions dans ces creux n'est pas très grande.

On trouve de l'eau dans les déserts sous forme de sources jaillissant par endroits dans le fond des vallées et entourées d'une végétation plus dense; l'eau coule quelque temps en ruisseau, mais disparaît ensuite dans les sables.

Les déserts de pierres sont des surfaces absolument plates ou légèrement ondulées, dont le sol sablonneux et argileux est jonché de graviers ou de débris anguleux, de pierres ou de galets. Le vernis du désert couvre souvent le gravier ou les galets, et ces déserts, complètement privés de végétation, ont l'aspect le plus lugubre. Ils occupent de grandes étendues dans le Sahara et en Arabie; les Arabes appellent les déserts couverts de gravier "hammada", et ceux qui sont parsemés de galets "sérir" (fig. 113 et 114). Mais dans l'un et dans l'autre, l'abondance du cailloutis ou du gravier résulte de ce que le vent en emporte le matériau fin en laissant sur place le plus grossier. Si nous creusons un peu le sol de ces déserts, nous verrons qu'il est constitué de sable argileux renfermant du gravier ou des galets. On rencontre aussi des déserts du type "hammada" ou "sérir" en Asie centrale, mais ils occupent des superficies plus réduites au fond des grandes dépressions ou le long des déserts montagneux, et l'on comprend clairement qu'ils sont étroitement liés à ceux-ci et sont constitués de proluvions, produites par les torrents temporaires (fig. 114).

Les déserts sablonneux sont des étendues de sables que constituent des "barkhanes" ou des dunes. Les sables des barkhanes et des dunes ne peuvent être considérés comme des sables du désert qu'en cas d'absence ou de rareté de la végétation, car lorsque cette dernière est suffisamment dense, ce sont des steppes ou même des forêts, s'ils sont couverts de pins (dunes) ou de saxaoul, cet arbre des sables.

La surface des déserts de sable est irrégulière, couverte de dunes ou de barkhanes, plus ou moins hautes et séparées par de courtes vallées ou dépressions où se font jour le sol argileux ou les affleurements de roches. C'est dans ces creux que s'abrite de préférence la végétation du désert sablonneux.

Quand la végétation fait complètement défaut, ce désert sablonneux produit une impression opprimante. En le regardant du haut de la crête d'une chaîne de dunes, on ne voit jusqu'à l'horizon que ces mêmes dunes de sable jaune, qui rappellent des vagues marines



Fig. 113. Désert de pierres du type "hammada" couvert de débris grossiers. Azlef dans le Sahara occidental.



Fig. 114. Désert de pierres du type "sérir" le long de la rivière Diam dans la Dzungarie.

soulevées par une rafale de vent et subitement pétrifiées. Si les herbes ou les buissons croissent quelque part, ils sont cachés dans les plis de terrain. L'aspect du désert sablonneux du Takla-Makan, où les barkhanes atteignent 200 mètres de haut et où il ne pousse rien, est encore plus terrifiant; ce ne sont plus des lames marines pendant une tempête qui apparaissent ici, mais une houle gigantesque qui se serait soudain solidifiée.

Il est très pénible de franchir les dunes transversalement ou

obliquement: on est astreint à franchir continuellement des crêtes, à descendre dans des creux; si le chemin que l'on suit est dirigé en sens inverse des vents dominants, on est obligé d'escalader les versants abrupts et meubles où les pieds des animaux s'enfoncent jusqu'aux jarrets, ce qui fait qu'ils s'épuisent rapidement. Il est plus facile de suivre le sens du vent, car de ce côté des dunes le sable est plus ferme et les pieds n'enfoncent pas, et il n'est pas si malaisé de descendre les versants croulants. Le plus facile, évidemment, est de suivre un chemin parallèle aux dunes et, de préférence, les vallées entre celles-ci; on n'aura à franchir que les petites crêtes qui séparent les creux. Pendant la période chaude de l'année, la surface dénudée des sables s'échauffe fortement au soleil et dégage de la chaleur comme un poêle; les déplacements dans toutes les directions sont alors encore plus pénibles.

Mais quand un vent assez fort s'élève, cette mer jaune solidifiée s'anime. Les dunes commencent à fumer, le vent arrache de chaque crête des filets de sable qui emplissent l'air, pénètre dans les yeux, crisse sous les dents. Sur les pentes orientées vers le vent, le sable court en ruisseaux qui serpentent vers le sommet, et tous les versants semblent se mouvoir; une partie du sable est arrachée des crêtes par le vent et tombe sur le flanc abrupt en cascades. L'air suffoquant s'emplit de poussière et devient opaque. Le soleil luit faiblement et apparaît comme un disque rouge mat, les horizons se cachent dans une brume épaisse. Il est impossible de poursuivre son chemin même à cheval sans lunettes spéciales pour protéger les yeux, car même à la hauteur du cavalier des grains de poussière volent, emportés par le vent. Si le vent atteint la force d'une tempête, le voyageur peut se perdre et périr, car il se verra dans la nécessité de continuer sa route dans des nuages de sable et de poussière, perdant sa direction, épuisant les bêtes de somme. Il vaut mieux s'abriter dans un creux et attendre la fin de la tempête.

Les déserts argileux ne sont pas très étendus. On les trouve généralement dans les déserts d'autres types où ils occupent de petites surfaces au fond de quelque dépression. Les côtes plates des grands lacs et de certaines mers intérieures (Caspienne, mer d'Aral, Méditerranée) sont par endroits des déserts argileux. Le sol est uni, argileux, habituellement divisé par les crevasses en sections hexagonales et dures au point que les fers des chevaux n'y laissent presque pas de traces. La végétation fait totalement défaut ou bien est représentée par de chétifs exemplaires qui se

sont fixés dans les fentes. En Asie centrale on appelle ces déserts "takyr". Leur sol est formé de limon fin qui se dépose au fond des dépressions plates, couvertes au printemps ou après de grandes pluies par une eau trouble qui s'évapore en quelques jours ou quelques semaines. Certains déserts sont des terrains salifères compacts ou meubles. Leur sol argileux est saturé de sels et couvert d'une végétation rare et chétive.

VI

LES PIERRES VOYAGEUSES

L'histoire de la pierre dans les labours. L'amoncellement de la neige dans les montagnes. Le névé. La formation du glacier et son mouvement. Les crevasses. Les moraines. La fonte du glacier. Avance et recul du glacier. Les types de glaciers. La grande période glaciaire et ses produits. Les indices des glaciations. La répétition et les causes des périodes glaciaires.

Allons nous promener dans les champs d'un kolkhoz quelque part dans le nord de la Russie européenne ou dans les environs de Léninegrad, de Kalinine, de Vologda, de Pskov. Nous remarquerons, sans doute, sur le sol gris des labours ou sur la tendre verdure d'un enclos ou d'un pré ou encore dans un bosquet, une pierre arrondie pouvant parfois peser une ou même deux tonnes. Nous pourrions rencontrer plus souvent des pierres plus petites, mais, dans les bois, elles sont cachées par les herbes et les buissons, et dans les champs elles sont depuis longtemps ramassées en tas, car elles gênaient les travaux agricoles. Seules les pierres trop grosses pour que l'homme puisse les déplacer sont restées en place. Le sol autour d'elles est friable, meuble, on ne voit pas d'affleurements de roches dures aux alentours. Nous ne trouverons de ces affleurements que dans les vallées fluviales profondément creusées.

Et nous restons interdits. D'où viennent ces pierres, quelle est la force qui les a portées jusqu'ici et les a dispersées par les champs et les forêts ? Un grand fleuve ne coulait-il pas là en des temps immémoriaux ? Peut-être sont-elles tombées du ciel ?

Non, elles ne sont pas tombées du ciel ; des pierres appelées météorites ou bolides tombent parfois sur la terre venant de l'espace interstellaire, mais ils ont un tout autre aspect et une composition toute différente, comme nous verrons plus loin. Ce n'est pas

non plus un fleuve qui les a apportées, mais une autre force, encore plus puissante, capable de transporter à des milliers de kilomètres des pierres pesant des dizaines et des centaines de tonnes, qu'aucun fleuve n'est capable de soulever. Cette force est la glace et les pierres ont été apportées par elle de la Finlande, de la Carélie, de la presqu'île de Kola. Et quelque invraisemblable que cela parais-



Fig. 115. Accumulation de neige (névé) sur le mont Feldberg (1492 mètres), Schwarzwald. Vue au début de l'été.

se, autrefois, en des temps pas tellement lointains du point de vue de l'histoire de la Terre, alors que l'homme primitif l'habitait déjà, tout le nord de l'Europe, de l'Asie et de l'Amérique du Nord était couvert de glace et avait l'aspect actuel du Groenland et de l'archipel François-Joseph, situés dans le climat rigoureux de l'Arctique, non loin du Pôle Nord. La Terre vivait alors son époque glaciaire. Pour comprendre comment se déplaçait et travaillait cet énorme linceul de glace, il faut faire connaissance avec les glaciers actuels que l'on trouve dans les montagnes du Caucase, de l'Altaï, dans les Alpes et en d'autres régions de la Terre.

Nous savons tous qu'il fait très froid dans l'atmosphère qui entoure notre Terre, même en été. Les aviateurs et les savants qui montaient en aérostat se sont convaincus, qu'à une hauteur de quelques milliers de mètres déjà, la température de l'air, même en été, descend de quelques degrés au-dessous de zéro et atteint, à une altitude, de 8000-10000 mètres, 30 à 40 degrés de froid.

Les mesurages de la température lors des ascensions en ballons stratosphériques ont montré qu'à 15000 ou 20000 mètres, la température, toute l'année durant, est de près de -70 degrés. Mais les hommes savaient depuis longtemps déjà qu'il fait aussi très froid au sommet des montagnes recouvertes de neige éternelle et où les intempéries, même en été, apportent de nouvelles chutes de neige.

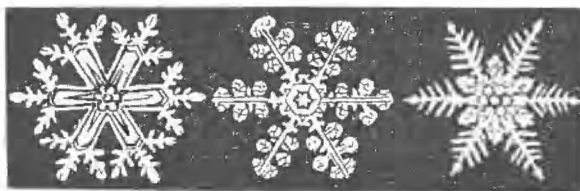


Fig. 116. Cristaux de neige.

La neige ne peut s'accumuler sur les cimes aiguës et les crêtes des montagnes, ni sur leurs versants abrupts; le vent l'en chasse; la neige fraîchement tombée, encore molle, dégouline en ruisselets, les grands amas de neige s'écroulent de temps en temps en provoquant des avalanches. Ce n'est qu'un peu plus bas, où la masse de neige repose sur le fond d'un creux ou d'une dépression quelconque, que son épaisseur peut augmenter quelque peu, mais sans dépasser cependant certaines limites. Les couches supérieures pèsent sur les couches sous-jacentes, les forcent à glisser lentement vers le bas, et sous cette pression la neige se transforme peu à peu en glace, quoique la température ne soit jamais supérieure à zéro. Les cristaux de neige (fig. 116) s'agglomèrent et forment des granules de glace. Nous pouvons voir cette neige transformée en glace dans les plaines après le dégel et au printemps également pendant la fonte des neiges. Dans les montagnes on l'appelle névé. Ce névé s'accumule en grandes quantités sur les versants des montagnes, dans les creux, les gorges, les vallées, et glisse incessamment et lentement vers le bas, les petits grains de glace se coagulant à leur tour pour en former de plus gros.



Fig. 117. Limites d'un champ de névé du glacier Ortler, Tyrol. On voit les strates, les ruptures et l'affaissement du névé.



Fig. 118. Champ de névé, glaciers avec chutes de glace et moraines. Sommet du Koenigskreutz, Tyrol.

Ces vallées et creux de haute montagne débouchent toujours vers des vallées plus larges. C'est vers cette vallée que chemine le névé, et c'est là que commence le glacier. Toute la surface d'où le névé s'écoule vers un seul et même glacier est appelé champ de névé. C'est la région qui l'alimente; la grandeur du glacier dépend des dimensions et de l'altitude du champ de névé, et, naturellement, des quantités de neige qui tombent sur les montagnes (fig. 117 et 118).

Le glacier sous la pression du névé qui l'alimente glisse vers la vallée. Mais comment la glace, qui est dure et fragile, peut-elle glisser: si on la frappe avec un marteau ou une hache, elle se brise en éclats? C'est juste, mais la glace, cassante sous l'action de forces instantanées devient plastique si ces forces agissent très longtemps. Il est facile de s'en convaincre en faisant l'expérience suivante. Posons un marteau sur un bloc de glace, et dans quelques jours nous verrons qu'il s'y est légèrement incrusté, la glace a cédé sous la pression de cette faible force qu'est le poids du marteau. Si nous posons une plaque de glace sur deux points d'appui, nous verrons dans quelques jours qu'elle a ployé sous l'action de son propre poids.

La glace qui forme le glacier n'est pas une masse transparente homogène comme la glace des rivières ou des lacs: elle est, comme le névé, constituée des grains, mais plus gros que ceux du névé, et c'est ce qui facilite son mouvement. Elle descend lentement, très lentement, vers le fond de la vallée en s'adaptant aux irrégularités de celle-ci. En vingt-quatre heures, comme le montrent les observations, un glacier de montagne avance de 3 à 40 centimètres, rarement de 1 à 4 mètres, suivant son épaisseur, sa largeur et la pente de la vallée. Les grands glaciers se déplacent plus rapidement, par exemple les glaciers du Groenland dont la vitesse atteint de 10 à 40 mètres par jour.

Les crevasses. Les glaciers ne sont cependant pas aussi plastiques que la cire ou la poix auxquelles on les compare souvent. Des crevasses multiples en sont la preuve. Les unes se forment au bord du glacier, parce qu'ici le mouvement de la glace est freiné par la friction contre les bords de la vallée; les parties latérales se déplacent plus lentement que le milieu. Cette inégalité de vitesses fait naître des crevasses orientées des bords vers le centre et d'ordinaire de peu de longueur et de profondeur. Des crevasses beaucoup plus grandes se forment à travers tout le glacier partout où l'inclinaison de son lit, c'est-à-dire du fond de la vallée, devient brusquement trop forte (fig. 120). La plasticité de la glace devient insuffisante,

Fig. 119. Moraines et chute de glace du glacier Sangouti-Dan.

elle se rompt, et le glacier se trouve coupé en dalles verticales ou même en blocs. Sur les pentes les plus fortes, des blocs de glace s'amoncellent, difficilement franchissables pour les alpinistes. Ces endroits sont appelés chutes de glace.



Fig. 120. Crevasses du glacier Sülden. Koenigspitz, Tyrol.

Plus bas, la pente devient moins forte, les crevasses se referment, les dalles et les blocs se réunissent et le glacier redevient plus uni.

Les crevasses sont dangereuses pour les alpinistes quand elles sont recouvertes par une couche de neige fraîchement tombée. Il est facile, alors, d'y faire une chute, car nombre d'entre elles ont une largeur de un à deux mètres et pénètrent souvent toute l'épais-



Fig. 121. Glacier du Grand Taldour, Altaï. On voit la formation de deux moraines médianes, venant des rochers émergeant du bassin de névé.

seur du glacier, qui atteint parfois cinquante, cent ou deux cents mètres. Mais la plupart des crevasses se resserrent en profondeur et leurs bords finissent par se réunir; leur fond est souvent rempli de neige. En tout cas les chutes dans les crevasses n'ont pas toujours une issue heureuse.

Les moraines. La surface du champ de névé est toujours blanche, nette. Quoique le gravier et les débris des roches détruites par le gel y tombent quelquefois, une neige fraîche les couvre bientôt. La surface du glacier est au début aussi propre que celle du névé; plus bas elle perd souvent de sa blancheur: on y voit apparaître en quantités plus ou moins grandes des moraines. Plus on descend vers le bas de la vallée, et plus les bords de celle-ci sont dénudés, la neige devient plus rare et les roches, sous forme de rochers et de falaises, apparaissent de plus en plus souvent. Les débris et le gravier s'en détachent de temps en temps et tombent sur la surface de la glace. Une longue traînée de ces débris se forme ainsi sur les bords du glacier; sa largeur et sa hauteur dépendent de la composition et de la hauteur des parois. Plus la hauteur de ces dernières est grande, plus les roches sont sujettes à la dégradation, et plus ces bourrelets, que l'on appelle moraines latérales, seront hauts et larges (fig. 122).

Nombre de glaciers sont formés par la réunion de plusieurs glaciers issus de champs de névé différents. Au confluent de deux

glaciers, la moraine latérale droite de l'un et la moraine latérale gauche de l'autre se joignent, et nous voyons apparaître plus bas, sur la surface du glacier, une troisième moraine qui le coupe longitudinalement en deux parties et que l'on appelle moraine centrale ou médiane. Un glacier composé peut posséder plusieurs moraines médianes (fig. 121).

Toutes ces moraines se trouvant à la surface de la glace sont appelées moraines superficielles. Mais il y a encore dans les glaciers des moraines intérieures. Quand les crevasses se forment, une partie du matériau qui constitue les moraines y tombe et continue ses déplacements à une profondeur plus ou moins grande, dans le corps même de la glace. De plus, tous les débris qui sont tombés sur le névé et ont été couverts par la neige voyagent également à l'intérieur de la glace.

La lourde masse de glace, en glissant sur son lit de roches, érode comme l'eau courante le fond sur lequel elle passe; elle use peu à peu son lit et entraîne les débris et les blocs qui s'en détachent. Les débris tombés dans les crevasses, traversant le glacier de haut en bas, s'y joignent. Tout ce matériau, incrusté dans la glace, chemine avec elle; une partie de celui-ci est arrêtée par les irrégularités du lit. Si le glacier recule, nous trouvons son lit jonché de ces débris qui constituent la moraine de fond. Ces débris se distinguent de ceux des moraines superficielles par ce que les pierres qui les cons-



Fig. 122. Glacier Mion-Sou, Biéloukha, Altaï. On voit les moraines latérale et de bordure (au premier plan, à droite).



Fig. 123. Côté droit du glacier Sangouti-Dan. On voit une moraine latérale. Au fond, rochers isolés appelés "nounataki", émergeant du glacier.

tituent sont plus ou moins arrondies, polies par leur friction les unes contre les autres et contre les roches du lit, alors que les débris formant les moraines superficielles et internes ont des arêtes vives et tranchantes.

Nous voyons souvent sur ces pierres polies par la friction contre la glace des stries fines ou de profondes rainures produites par les arêtes de pierres plus dures enchâssées dans la glace. Ces égratignures et sillons sont appelés cicatrices glaciaires. On en trouve également à la surface du lit du glacier, que la glace et les pierres incrustées ont poli et strié.

Les glaciers descendent plus ou moins loin dans les vallées, mais toujours plus bas que la limite des neiges éternelles, c'est-à-dire la ligne au-dessous de laquelle la température monte en été au-dessus de zéro et la neige fond. Au-dessous de cette limite, le glacier commence à fondre, il diminue de volume et finit par disparaître tout à fait, et tous les matériaux qui se trouvent sur sa surface ou pris dans la glace se libèrent, s'amoncellent en tas ou en rangées et forment un nouveau type de moraine, les moraines frontales (fig. 124 et 125). C'est pourquoi nous trouverons dans ces moraines



**Fig. 124. Moraine frontale du glacier Mion-Sou sur le
mont Biéloukha, Altaï.**



**Fig. 125. Moraines frontales et alluvions fluvio-glaciaires
du glacier Ak-trou, Altaï.**



Fig. 126. Grotte glaciaire. Extrémité du glacier Mion-Sou, Biéloukha, Altaï.

un mélange très varié, formé de débris de toutes les espèces de roches, qui constituent les parois des bassins de névé et de la vallée, débris anguleux, légèrement arrondis ou tout à fait ronds et de toutes les dimensions. Tous ces matériaux ont été entraînés par le glacier et mis en tas.

La fonte du glacier. Comme nous venons de le dire, à la limite des neiges éternelles, le glacier commence à fondre, d'abord très faiblement, puis de plus en plus intensément au fur et à mesure qu'il descend plus bas dans la vallée; la masse de la glace se réduit, ce qui provoque à la surface du glacier des phénomènes intéressants.

Une grande dalle rocheuse tombée du versant recouvre la glace, la préserve de la fonte, alors que tout autour la glace fond et son niveau baisse. Dans quelque temps, la dalle restera juchée sur une sorte de piédestal de glace. C'est une table de glacier (fig. 127). Mais ce support, sous l'action de l'air chaud, continue à fondre, devient plus mince et alors le bloc, perdant l'équilibre, tombe sur la glace pour donner naissance à une nouvelle table.

Il en est tout autrement des petites pierres qui se trouvent à la surface du glacier. Elles sont chauffées par le soleil et comme elles absorbent la chaleur plus énergiquement que la glace environnante, elles liquéfient peu à peu la glace qui se trouve au-dessous d'elles et y pénétrant de plus en plus profondément, finissent par se trouver

au fond d'une sorte de petit puits vertical. Ce sont les cribles glaciaires (fig. 128).

Dans le champ de névé, la neige ne tombe pas continuellement, les chutes de neige alternent avec les beaux jours pendant lesquels le vent apporte sur la surface de la neige la poussière provenant des rochers environnants. C'est pourquoi le névé n'est pas homogène, mais stratifié. Après chaque chute de neige le vent apporte un peu de poussière, des feuilles, des détritits venus des routes voisines, de la suie issue des cheminées surtout dans le voisinage des villes et des usines. Vous pouvez d'ailleurs vous convaincre que la neige des plaines n'est pas homogène, elle non plus. La couche de neige provenant de chaque chute est séparée de la suivante par une mince bande sombre de poussière.

Dans le bassin de névé, la neige s'accumule en couches successives, qui deviennent plus compactes et plus minces en se transformant en névé. Le névé stratifié, enfin, se transforme en glace stratifiée elle aussi, ainsi qu'on peut l'observer sur les parois des crevasses; là où le glacier est en grande partie fondu, les couches apparaissent à la surface sous forme de courbes aux sinuosités bizarres provoquées par le mouvement irrégulier des différentes parties de la glace.

Si le glacier est riche en moraines superficielles, la glace peut souvent être complètement recouverte de pierres dans sa partie inférieure appelée langue du glacier. L'observateur voit des roches et débris amoncelés en désordre à la jonction des moraines latérales



Fig. 127. Table de glacier. Mer de Glace, Suisse.

et médianes sans deviner qu'elles cachent la glace. Ce n'est qu'en remontant le glacier qu'il pourra l'entrevoir par endroits.

L'extrémité du glacier a un aspect différent suivant l'épaisseur de la glace et l'abondance des moraines. Si la glace est épaisse et les moraines superficielles rares, cette extrémité a l'aspect d'une falaise de glace fortement crevassée dont se sont détachés des blocs grands et petits. Un ruisseau ou même une véritable rivière, ayant amassé toute l'eau résultant de la fonte du glacier, s'en échappe. Cette eau s'écoule par les crevasses du glacier vers ses profondeurs (fig. 129). La rivière sort parfois d'un joli tunnel de glace, à l'entrée duquel se trouvent les fragments de roches provenant des moraines (fig. 126). Si les pierres y sont abondantes, son extrémité est plus ou moins encombrée de débris de roches et disparaît même parfois sous leur amoncellement.



Fig. 128. Cribles glaciaires.

L'eau de la rivière issue de sous le glacier est toujours boueuse, car elle emporte toute la poussière qui en provient, ainsi que le sable et le limon qui se sont formés dans son lit à la suite de l'érosion, de même que sur les moraines par suite de leur destruction par le gel. La rivière charrie les galets et les pierres provenant des moraines internes et de la moraine de fond. S'échappant de la glace, la rivière attaque également la moraine frontale et emporte tous les matériaux qu'elle est capable d'entraîner. Mais la force de la rivière est variable; en hiver, quand le glacier ne fond pas, elle est très faible; au printemps et en automne, quand la fonte de la glace est moins intense, elle est un peu plus grande, alors qu'en été, lorsque le glacier fond intensément, la rivière se gonfle et travaille avec une force accrue.

Au-delà de l'extrémité du glacier et sur une distance atteignant parfois plusieurs kilomètres jusqu'à la limite de la zone de végétation, le fond de la vallée est dénudé et couvert de sable, de galets et de blocs erratiques apportés par la rivière. C'est à travers ces alluvions, que l'on appelle alluvions fluvio-glaciaires qu'elle serpente en suivant un ou plusieurs lits (voir fig. 125).

Avance et recul du glacier. L'extrémité du glacier ne reste pas sans bouger, elle se déplace tantôt vers le haut, tantôt vers le bas de la vallée, car la masse du glacier est sujette à des changements en fonction des modifications du climat. Ces dernières peuvent être

fortuites et de courte durée ou prolongées et durer plusieurs années. Il y a des années qui sont plus riches en précipitations atmosphériques et d'autres qui le sont moins. Pendant les premières, le bassin de névé reçoit plus de neige, la masse du glacier augmente et sa langue s'avance vers le bas: le glacier "attaque". Pendant les années où les précipitations atmosphériques sont rares, la masse du glacier diminue, sa langue se déplace vers le haut: le glacier recule. Etant donné la lenteur du cheminement de la glace, ces modifications ne se font sentir que quelques années plus tard.

Le climat d'un pays peut changer pour longtemps dans un sens quelconque; par exemple, par suite du déboisement, de

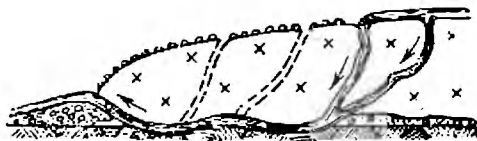


Fig. 129. Coupe de la langue d'un glacier. On voit les fissures que suit l'eau pénétrant de la surface sous le glacier et les dépôts des moraines de fond et frontale.

l'assèchement des lacs, le climat peut devenir plus sec, ce qui entraînera après quelque temps un recul de tous les glaciers de ce pays d'année en année. On observe un phénomène de ce genre dans les Alpes suisses, au Caucase, dans l'Altaï et dans le Tian-Chan.

Les types de glaciers. Les glaciers peuvent être de dimensions variables et occuper des situations différentes suivant le relief de la région, son altitude et les quantités de précipitations atmosphériques. Dans les montagnes d'altitude modérée, seules les crêtes et les cimes les plus hautes s'élèvent au-dessus de la limite des neiges éternelles. Les surfaces couvertes de neige sont réduites, les bassins de névé sont petits. Les glaciers sont pauvrement alimentés et ne descendent pas loin, se terminant au débouché même du bassin de névé ou parfois à flanc de la montagne. Les premiers sont appelés glaciers encaissés et les seconds, glaciers suspendus, car ils sont comme suspendus au-dessus de la crête, où une petite étendue de névé les alimente (fig. 131). Les glaciers encaissés sont alimentés par le névé remplissant de grandes cavi-

tés en forme d'hémicirque découpées à pic dans le flanc des montagnes, à versants abrupts et à fond plat. On pourrait comparer ces dépressions au fauteuil d'un géant dont les bras et le dossier seraient proéminants et le siège creux (fig. 132 et 133). Le bassin de névé d'un hémicirque isolé n'est pas grand et le glacier descend



Fig. 130. Moraine ancienne (érodée) sur la rive droite de la rivière Katoune, Altaï.

à peine sur le versant. Il est à noter que nous trouverons de ces demi-cercles dans de nombreuses montagnes, mais si les montagnes sont plus hautes, toute une série d'hémicirques et le fond de la vallée sur laquelle ils débouchent font partie d'un même bassin de névé et ils peuvent, tous ensemble, alimenter un grand glacier.

Les glaciers qui occupent une vallée montagneuse sont appelés glaciers de vallée. Quand les montagnes sont soumises à une glaciation intense, le glacier peut déboucher de la vallée mon-

tagneuse dans la plaine qui se trouve au pied de la montagne; plusieurs glaciers réunis dans une plaine forment un glacier de piedmont. On trouve de ces glaciers en Alaska du sud. Dans les glaciers situés au pied des montagnes, la glace s'étale en éventail loin dans la plaine, mais son épaisseur est naturellement



Fig. 131. Glacier suspendu du mont Tauernkopf, Alpes autrichiennes.

plus faible. Sur les îles montagneuses de l'océan Glacial Arctique, sur la Nouvelle-Zemble, au Spitzberg et sur l'archipel François-Joseph, de nombreux glaciers débouchant des vallées montagneuses descendent directement vers la mer. De temps en temps de grandes masses de glace se détachent de leurs extrémités, sont emportées par les courants et en atteignant la mer y deviennent des montagnes de glace, des icebergs de différente grandeur. Ces glaciers n'ont pas de moraines frontales visibles, les débris pierreux qui en proviennent tombent à l'eau.

Types de régions glaciaires. Les pays montagneux portant des glaciers se subdivisent en fonction de leur relief et de l'épaisseur de leurs glaciers en trois types. Si nous voyons dans un pays divisé par les vallées en chaînes montagneuses des glaciers de vallée, alors que sur les crêtes et les cimes, des rochers nus sont

souvent en saillie, nous aurons affaire à un pays de type alpestre, du nom des Alpes de Suisse où ce type est très répandu. Si le pays n'est pas si nettement découpé et si les vallées de haute montagne sont des plateaux assez vastes qui, entièrement couverts de neige servent de bassins de névé aux glaciers plus ou moins grands, nous serons en présence du type scandinave qui est très répandu actuellement au nord de la péninsule du même nom. Si un grand plateau est complètement couvert de glace ou si un pays montagneux possède des glaciers si épais que tous les versants en sont couverts et que seuls certains pics isolés s'élèvent au-dessus de la couche de glace, il s'agira du type dit polaire. Nous trouverons actuellement ce type au Groenland, sur l'archipel François-Joseph et dans l'Antarctide (fig. 135 et 136).

Des glaciers de ce dernier type couvraient autrefois tout le nord de l'Europe, de l'Asie et de l'Amérique du Nord. Notre Terre vivait alors une époque glaciaire ou plus précisément quatre époques glaciaires. Durant chacune d'entre elles, une couverture glaciaire se développait, atteignant des épaisseurs différentes, puis l'épaisseur du glacier se réduisait fortement ou même celui-ci disparaissait tout à fait

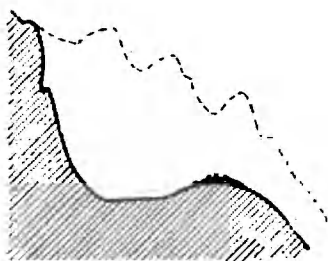


Fig. 132. Coupe longitudinale d'un hémicirque glaciaire.

pour réapparaître après un certain temps. Les intervalles entre les glaciations s'appellent époques interglaciaires : il y en eut trois. La période qui a suivi la dernière époque glaciaire est appelée époque postglaciaire ; elle dure, en fait, jusqu'à présent, car nous trouvons des restes de la dernière époque glaciaire dans l'Arctique, au nord de l'Europe, dans les Alpes, le Caucase, dans l'Altaï et dans les autres montagnes sous forme de glaciers actuels.

Pendant les époques glaciaires, le climat de l'hémisphère boréal était plus rigoureux qu'à présent, les précipitations atmosphériques plus abondantes, principalement sous forme de neige qui, pendant le court et froid été n'avait pas le temps de fondre entièrement. Nous trouvons la neige de l'année passée actuellement sur les montagnes les plus hautes de l'Oural septentrional et de la Sibérie sous forme de champs isolés ou de bandes sur les



Fig. 133. Champs de neige et lacs dans les hemicirques anciens sur le Tchébal-Taskyl, Alataou de Kouznetsk.



Fig. 134. Le Khan-Tengri, un des sommets les plus élevés du Tian-Chan. Bassin de névé du versant nord. A l'avant-plan, la surface du grand glacier couvert de moraines.

versants nord et dans les creux. On appelle ces champs de neige *péréliotki*, et les montagnes où la neige se conserve longtemps sont appelées montagnes blanches. Au début de chaque époque glaciaire, comme le climat se refroidissait, des champs isolés de ce genre commençaient à apparaître dans le Nord, en Scandinavie, en Finlande, au Canada, en Sibérie, ils augmentaient en nombre d'année en année et occupaient des surfaces de plus en plus gran-



Fig. 135. Extrémité de la calotte glaciaire, Groenland.

des. Plus tard, après une période très longue (car les changements de climat n'ont lieu que très lentement), ces champs isolés s'unissaient en une calotte glaciaire continue qui couvrait toutes les éminences, les vallées et les plaines restant encore libres. La neige sur les montagnes s'accumulait d'année en année, mais comme elle ne peut s'amasser indéfiniment, elle commençait à se transformer en névé et à glisser vers les vallées sous forme de glaciers, envahissant peu à peu les vallées elles aussi.

Ces grands espaces couverts de neige, de névé et de glace rendaient le climat encore plus rude. La période de fonte des neiges et des glaces diminuait. La plus grande partie de l'année, les précipitations atmosphériques étaient de la neige, et l'épaisseur de la couche de glace ne faisait que s'accroître. Sous l'action du refroidissement, les régions situées plus au sud commençaient à se couvrir çà et là elles aussi de neige qui, à leur tour se trans-

formait en couche continue couvrant toujours de nouveaux espaces. Les glaciers qui descendaient par toutes les vallées gagnaient en longueur et en épaisseur. Quand cette couverture de glace couvrit toute la Finlande, la Carélie et la Scandinavie septentrionale qui sont montagneuses, les glaciers se mirent à descendre vers les plaines situées plus au sud. Certains d'entre eux s'unis-

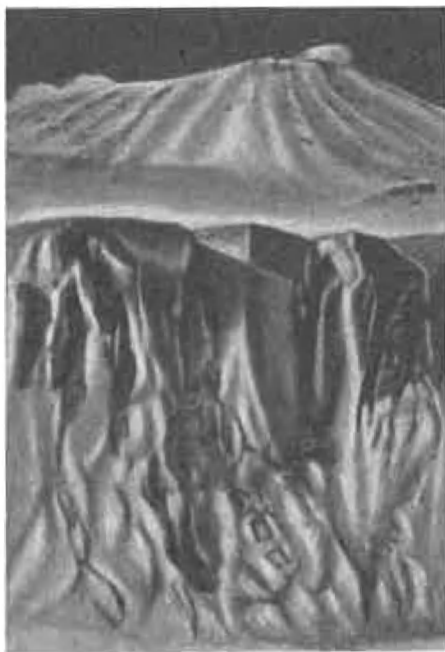


Fig. 136. Abrupt de la calotte glaciaire de l'Antarctide près du mont Erébus.

saient, puis commençaient de cheminer lentement, très lentement, durant des siècles, avançant de plus en plus vers le sud, envahissant des territoires toujours nouveaux (fig. 137 et 138).

A l'extrémité sud, la glace, naturellement, fondait et donnait naissance à des cours d'eau qui couraient vers le sud, ou à des lacs qui se formaient dans tous les creux où l'eau pouvait s'accumuler. Mais la fonte, durant le court été, ne pouvait équilibrer l'accumulation de la neige pendant le long hiver, surtout que plus au nord il neigeait même en été. L'épaisseur de la glace crois-

sait et, par suite, le glacier continuait toujours son avance vers le sud. En se basant sur l'épaisseur actuelle des glaces du Groenland et de l'Antarctide, on estime à 2000 mètres l'épaisseur de la glace sur les hauteurs des montagnes qui servaient de centre de la glaciation. Il est difficile d'imaginer même que la Finlande, le Nord scandinave, le Canada et le Nord de la Sibérie étaient couverts d'une couche de glace de deux kilomètres d'épaisseur. Mais c'est incontestable, car, si au centre la glace avait eu une

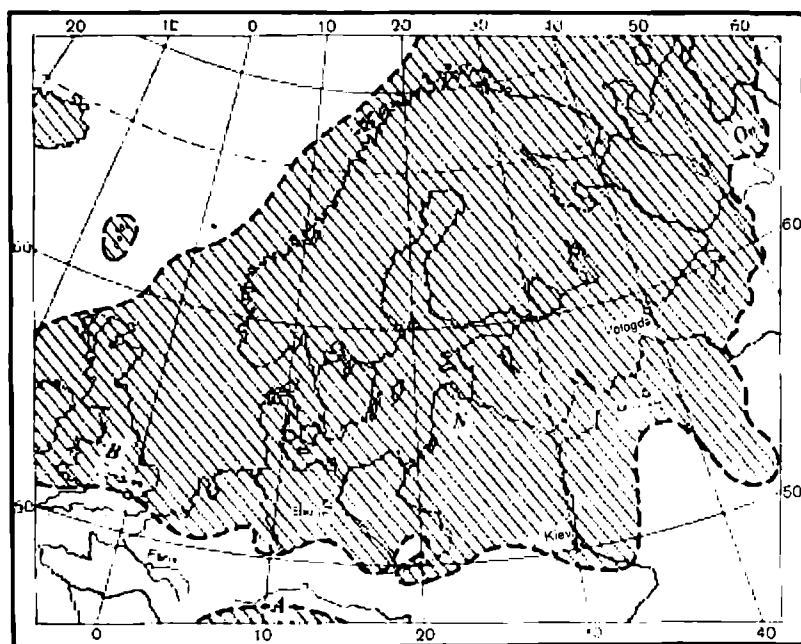


Fig. 137. Carte de la glaciation maximum de l'Europe. Glaciers :

A — alpin, *B* — britannique, *N* — du Nord, *Ou* — de l'Oural.

épaisseur de quelque deux cents ou trois cents mètres, elle n'aurait pu progresser si loin vers le sud. Et cependant, en Europe, elle gagna Moscou, Kiev, Koursk, Varsovie, Berlin. Pour qu'un tel voyage fût possible, il fallait une grande pression au centre. Vers le sud, naturellement, l'épaisseur de la glace diminuait de plus en plus.

Comme les glaciers contemporains, ce glacier gigantesque, marchant à la surface de la terre et faisant pression sur toutes

les aspérités, brisait et entraînait de menus débris et des blocs entiers de roches, du gravier, du sable, l'argile des alluvions. Il usait, polissait les saillies de roches, les éraflait, les striait. Comme il ne rencontrait pas de hautes montagnes sur son passage et vu l'énorme épaisseur qu'atteignait la glace dans ses centres de formation, il ne laissait pas de moraines superficielles; il n'y avait que des moraines internes formées par les matériaux que le glacier arrachait de son lit.

Que se passait-il à la limite sud du glacier? Le climat ici était suffisamment chaud, et la glace fondait intensément, accumulant les débris transportés par elle sous forme de moraines frontales. De nombreux ruisseaux et rivières s'échappaient de dessous le glacier, entraînant le limon, le sable, les galets et les déposant peu à peu sous forme d'alluvions fluvio-glaciaires. Leur niveau variait, atteignant le maximum en été, baissant au printemps et en automne et se réduisant au minimum en hiver. C'est pourquoi, en été, ces rivières débordaient, inondaient de larges étendues et coulaient en hiver dans un lit étroit. Certaines rivières coulaient longuement sous la glace, dans un tunnel et déposaient leurs alluvions sous forme de remblais longs et étroits.

Progressant peu à peu vers le sud et couvrant des surfaces toujours nouvelles, l'énorme glacier a enfin cessé d'avancer par le fait que l'appoint de neige à sa surface était équilibré par les pertes dues à la fonte de la glace sur toute la surface de fonte. Cet état d'équilibre a duré des centaines ou même des milliers d'années. Puis les pertes ont dépassé l'appoint et le glacier a commencé à se réduire, autrement dit, son extrémité sud a commencé à reculer vers le nord, libérant des régions qui se trouvaient depuis longtemps sous les glaces. Ces régions étaient, naturellement, de véritables déserts, dont la surface était couverte d'une couche plus ou moins épaisse de matériaux de moraine de fond sous forme d'argile ou de sable argileux avec des pierres erratiques plus ou moins grandes; dans les creux des anciennes vallées, cette couche était plus importante, sur les hauteurs, moindre. A la surface étaient dispersés des blocs de roche de différentes dimensions provenant des moraines internes. Des talus hauts et étroits, rappelant les remblais des voies ferrées et qui sont les dépôts des cours d'eau coulant autrefois sous la glace, s'étendaient de part et d'autre. On les appelle cesars. En d'autres endroits, les fleuves sous-glaciaires charriaient beaucoup de sable et le déposaient à l'extrémité du glacier formant des champs avec une surface irrégulière. Ces surfaces ensablées sont appelées zandres.

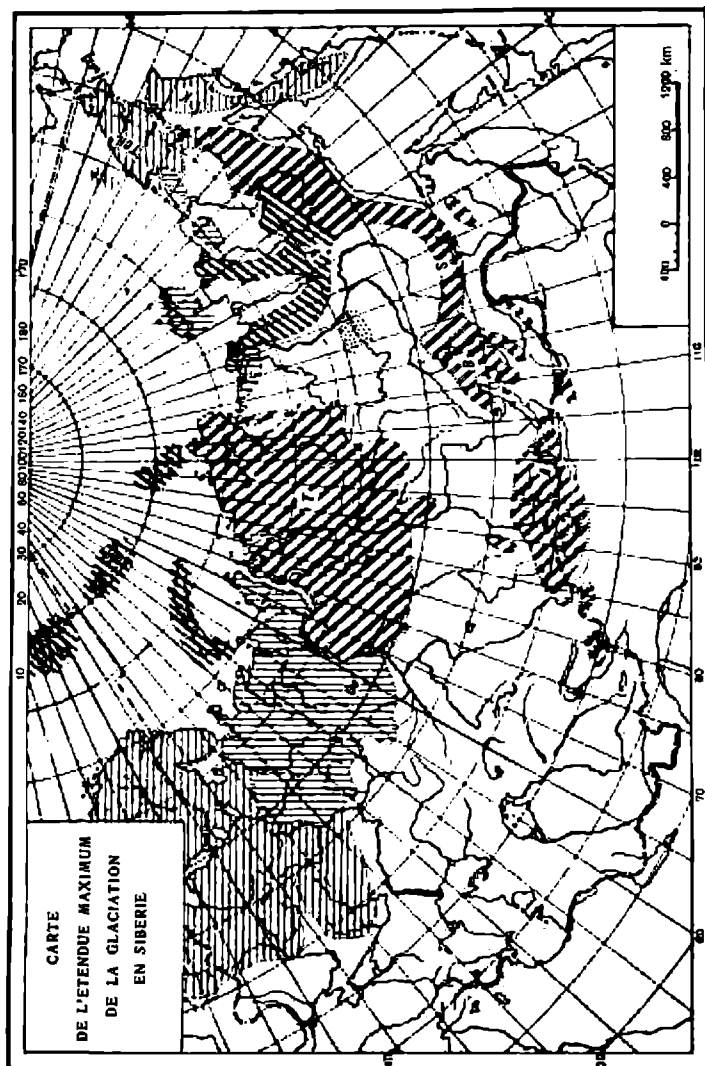


Fig. 138. Carte de l'étendue maximum de la glaciation en Sibérie. Glaciers :
Ou — de l'Oural, T — de Taimyr, V — de Verkhoïansk, Tch — de la Tchoukotka,
K — du Kametchatka, A — des Altaï-Saïan, B — baïkalien S — Stanovoï.



Fig. 139. Argiles rubannées ou varves, chiffonnées par un glissement de terrain sous-marin. Rivière Tchernaiïa (Noire) près de Possolodino, région de Léninegrad.

Les moraines frontales ne pouvaient se former que par suite d'une interruption du recul durant un temps assez long, ce qui arrivait de temps en temps. Une quantité d'eau encore plus grande, pendant la période d'avance ou d'équilibre, s'échappait de sous le glacier, parce que la glace fondait plus intensément. Ces ruisseaux et rivières sous-glaciaires charriaient beaucoup de matériaux, ils attaquaient la moraine de fond, sur laquelle ils coulaient, débordant pendant les crues printanières, subissaient des crues en été, se diminuant en hiver, abandonnant leurs dépôts fluvio-glaciaires: galets, sable, argile. En maints endroits, des lacs petits et grands apparaissaient à l'extrémité du glacier, et les matériaux morainiques s'y déposaient. Les petites pièces d'eau étaient vite comblées et disparaissaient, les lacs plus importants subsistaient plus longtemps et un sable fin, de l'argile, du limon s'y déposaient sous forme d'argiles et d'argiles sablonneuses dits varves ou rubannées, d'où une alternance de couches fines de un ou deux millimètres d'épaisseur, de différentes couleur et composition est nettement visible. Cette alternance s'explique par le fait qu'en été, lorsque la fonte des glaces atteint son point

culminant, l'eau entraîne des particules plus grossières et en quantités plus grandes, alors qu'en hiver, lorsque la glace fond de façon moins intense, leur nombre se réduit, la force portante de l'eau s'affaiblit, et les eaux ne peuvent amener dans le lac que les matériaux les plus fins: limon fin ou argile. En comptant les strates de ce genre dans les dépôts d'un lac quelconque, nous pouvons apprendre quelle a été la durée de son existence avant qu'il fût comblé par les dépôts (fig. 139).

Le savant suédois Gérard de Geer s'est chargé de compter les couches d'argile rubannée dans toute une série d'anciens lacs du sud de la Suède et a calculé qu'il a fallu 2000 ans au glacier pour reculer de l'extrémité sud de la Suède jusqu'à Stockholm, c'est-à-dire de 400 à 450 kilomètres, soit un déplacement annuel de 200 à 225 mètres.

Le recul du glacier a duré de nombreux millénaires, allant de Koursk à Moscou, puis jusqu'à Léninegrad, Pétrozavodsk, après quoi la Finlande et enfin la Scandinavie furent libérées, et le glacier disparut tout à fait. Et plus nous avançons vers le nord, plus nous voyons les régions se libérer tardivement des couches de glace, et les marques qu'ont laissées les glaciers deviennent de plus en plus nettes, parce que l'eau courante a travaillé moins longtemps à effacer ces traces. C'est pourquoi il semble à l'observateur qui se trouve au nord, quelque part en Finlande ou sur la presqu'île de Kola, que la glace n'a abandonné ces parages que



Fig. 140. Paysage morainique près du lac Daïn-Gol, Altaï mongol.



Fig. 141. Bloc erratique glaciaire, vallée de la rivière Djéty-Ogouz,
R.S.S. de Kirghisie.

très récemment. Il voit les talus des moraines frontales, aujourd'hui couverts d'herbes, de buissons, de bocages, labourés ou habités, mais conservant, cependant, leur relief caractéristique : pays ondulé comportant de nombreuses dépressions avec de petits lacs ou des étangs (fig. 140). Ailleurs il voit des œsars allongés (en Finlande certains d'entre eux s'étendent sur des dizaines de kilomètres) ou les surfaces planes des moraines de fond ou encore les champs d'alluvions glaciaires, les zandres. Et partout, il trouve dispersées des pierres grandes et petites abandonnées par le glacier. On y voit de nombreuses stries, des sillons et même des surfaces polies, résultat du travail des glaces. Les grands blocs de roche abandonnés par le glacier sont appelés blocs erratiques, c'est-à-dire errants (fig. 141).

Là où les roches dures affleuraient à la surface, on peut voir les conséquences du travail du glacier : tous les angles, toutes les saillies sont arrondis, aplanis et les affleurements ont l'aspect de roches moutonnées aux aspérités arrondies avec des creux plats entre elles (fig. 142). Certaines roches moutonnées ont un aspect très particulier : elles sont fortement arrondies du côté où la glace les attaquait, couvertes de stries, polies, et montent en pente douce, alors que le côté opposé, où la glace descendait, est

bien moins érodé, présente beaucoup plus d'aspérités et est plus abrupt. Les roches de ce genre sont appelées fronts de bélier.

L'ensemble de ces formes: moraines, creux qui les séparent, oesars, roches moutonnées, pierres erratiques, contribue à composer un paysage caractéristique appelé paysage glaciaire ou morainique qui révèle très nettement que cette région était autrefois couverte de glace. Nous trouvons des paysages de ce genre dans nos plaines du nord et dans les montagnes autrefois couvertes de glaciers, dans l'Oural septentrional, au Caucase, dans les Carpathes, dans les montagnes de Sibérie.

Nous savons maintenant d'où proviennent les pierres erratiques qui parsèment en telle quantité nos plaines. Elles nous gênent quand il s'agit de labourer ou de faucher, mais elles sont utilisées pour le pavage des rues dans le Nord et dans les régions du centre: dans les régions de Léninegrad, de Novgorod, de Kalinine, de Vologda, de Moscou, en Biélorussie, jusqu'au Nord de l'Ukraine, où les roches dures affleurent rarement et ne sont pas utilisables à cet effet (ou bien elles sont trop tendres et s'usent rapidement, ou bien elles sont trop dures et difficiles à façonner). Les blocs erratiques dispersés dans les champs ou ceux qui se sont trouvés emportés durant la période postglaciaire dans le lit des cours d'eau, sont un matériel tout prêt pour le pavage des rues. Il s'agit



Fig. 142. Front de bélier, énorme rocher poli par la glace à l'embouchure de la vallée de la rivière Iédyguem, débouchant dans la vallée de l'Argout, Altaï.



Fig. 143. Paysage morainique dans le cours supérieur de la rivière Tourguéni dans le Terskéi-Alataou.

simplement de les assortir suivant leur grosseur, ils sont de bonne qualité: ce sont pour la plupart des roches finlandaises suffisamment dures. Si ce matériel nous faisait défaut, toutes les villes du nord et du centre de l'U.R.S.S. seraient noyées dans la boue ou devraient se contenter de chaussées en bois, onéreuses et peu résistantes. Tout récemment les pavés ont disparu des rues principales des grandes villes, cédant la place à l'asphalte, mais en revanche ils sont de plus en plus utilisés dans les villages et dans les villes de faible importance. Les gros blocs erratiques, trop grands pour le pavage des rues, sont utilisés pour l'aménagement des chaussées.

On ramasse ces pierres dans les champs, on les entasse aux bords des routes, on les casse et on en fait des chaussées.

Nous devons donc savoir gré au Grand glacier du Nord qui nous a apporté tant de matériaux de bonne qualité et à bon marché de la Finlande et de la presqu'île de Kola et les a dispersés un peu partout.

Le glacier du Nord ne nous a pas seulement apporté des pavés pour nos rues. Le loess est également un produit de l'époque

glaciaire, le loëss ukrainien notamment. Le glacier, pendant ses avances et durant ses reculs, créait devant lui un désert sous forme de moraines, d'alluvions fluvio-glaciaires que la végétation ne pouvait défendre contre l'érosion, puisqu'elle n'existait pas. Les vents qui soufflaient du glacier soulevaient ces dépôts meubles et les emportaient vers le sud sous forme de sable et de poussière; le sable formait des dunes dans les limites mêmes du désert, la poussière était emportée plus loin et se déposait dans les steppes, couvrant le sud de la plaine russe, en s'accumulant peu à peu et se transformant en loëss. Après la disparition du glacier, le climat



Fig. 144. Coupes transversales de vallées fluviale (a, b, c, d) et glaciaire (e).

a changé et est devenu plus humide. L'ancien désert du nord s'est couvert de forêts, mais on peut trouver, sous ces forêts, du sable, notamment dans les environs de Moscou et dans le Polessié. De gras pâturages apparurent dans les steppes du sud, l'humus a commencé à s'accumuler pour se transformer en terre noire couvrant le loëss et s'intégrant peu à peu à celui-ci. Par conséquent, le loëss de l'Ukraine est le produit d'un ancien désert qui s'était formé à la limite sud de la couverture glaciaire et a naturellement disparu avec ce glacier.

Les indices des glaciations. Aux temps où les deux tiers de la partie européenne de l'U.R.S.S. étaient couverts de glace, les glaciers existaient aussi dans l'Oural du Nord et en partie dans le Moyen Oural, où on n'en trouve plus à présent à l'exception de quelques petits glaciers dans le nord. Au Caucase, il y a encore beaucoup de glaciers à l'heure actuelle, mais autrefois ils étaient bien plus nombreux et descendaient jusque dans les plaines environnantes. Ce qui nous révèle dans les montagnes l'ancienne présence de glacier, c'est le paysage morainique. Si nous escaladons des montagnes où les glaciers n'existent plus, nous trouverons d'abord, au fond des vallées, les moraines frontales qui indiquent l'emplacement qu'atteignait autrefois la glace à l'époque de son extension maximum. Elles sont, évidemment, depuis longtemps

couvertes de végétation et représentent une ou plusieurs chaînes de collines qui barrent presque entièrement la vallée et ne laissent passage qu'à un cours d'eau qui a creusé son lit dans la moraine. Entre les collines, de légères dépressions qui, de même que la répartition chaotique des collines, montrent à quoi nous avons affaire. En fouillant au sommet de la colline (si une coupe naturelle du côté de la rivière fait défaut), nous pouvons constater qu'elle est constituée de pierres erratiques de différente grosseur, dispersées en désordre dans le sable, l'argile et l'argile sablonneuse; sur certaines de ces pierres nous trouverons encore le polissage et les cicatrices témoignant du travail du glacier.

Plus haut dans la vallée, nous pouvons trouver encore une ou plusieurs moraines frontales déposées pendant les périodes de stationnement du glacier, lors de son recul. Entre ces moraines nous remarquerons certainement, parfois assez haut sur le versant de la montagne, des pierres erratiques de différente grandeur, et dans ce cas nous pourrions même établir de quelle épaisseur était le glacier. Outre les moraines frontales on rencontre également des moraines latérales qui sont restées sur les flancs des montagnes lors de la diminution du glacier, mais elles sont plus rares, parce que soumises pour la plupart des cas au travail de l'eau courante qui les émousse ou les emporte. Quelquefois nous pouvons apercevoir un front de bélier et sur les saillies de roches, au fond des vallées, des roches moutonnées.

Au fur et à mesure que nous marchons vers le haut de la vallée, les traces des glaciations deviennent plus nettes et plus nombreuses, les moraines frontales sont plus fréquentes et mieux conservées et barrent parfois entièrement la vallée en y retenant un lac plus ou moins grand. Les moraines latérales sont mieux conservées également, les fronts de bélier et les roches moutonnées sont plus fréquents. Nous verrons aussi que les vallées se terminent par les versants plus ou moins raides formant un cirque qui servait de bassin de névé; près des crêtes nous verrons des hémicirques creusés à flanc des montagnes à fond plat et bords abrupts. En certains cas, leur fond est occupé par un petit lac séparé de l'embouchure par une moraine frontale ou un seuil de pierre. De petits glaciers s'y sont longtemps conservés après le recul de la glace (fig. 133).

La coupe transversale de la vallée qu'empruntait le glacier est très particulière, elle aussi. Les vallées, creusées par un cours d'eau ont, vers leurs sources, une coupe transversale en forme

de V (fig. 144, a), autrement dit, un fond étroit et des berges plus ou moins escarpées. Plus bas, dans la région d'érosion latérale, la vallée s'élargit et a, en coupe transversale, la forme d'un trapèze (fig. 144, b), alors que dans les zones inférieures, dans la région de dépôt, son fond est plus large encore et ses versants en pente plus douce (fig. 144, c et d). Les vallées des glaciers ont en coupe la forme d'un U (fig. 144, e); leur fond est plus large, mais concave, creusé par la glace, et a des versants plus raides que le glacier érodait en même temps qu'il emportait les produits de l'érosion qui tombaient des versants (fig. 145). Ces éboulis dans les vallées fluviales s'amassent au bas des versants sous forme de déluvions et adoucissent la pente des berges (fig. 146).

L'ensemble de ces indices permet à l'observateur non seulement de déterminer avec certitude que cette vallée était récemment occupée par un glacier, mais d'établir sa longueur par la situation des moraines frontales les plus avancées, l'épaisseur de la glace, grâce aux pierres erratiques demeurées sur les versants, et la limite approximative des neiges éternelles à l'époque glaciaire par les fonds des glaciers encaissés, qui sont habituellement disposés au niveau de cette limite.

L'observateur pourra dire également combien de fois et en quel endroit de la vallée le glacier s'est arrêté lors de son mouvement de recul: là où les moraines frontales se sont conservées, et les dimensions de ces dernières permettent de juger de la durée de ces stationnements (fig. 147). Il existe même des indices permettant de savoir si la glaciation dans notre vallée a eu lieu une seule ou plusieurs fois. C'est cette dernière question que nous allons examiner maintenant.

Répétition des glaciations. Après que les savants ont réussi à déceler les traces de la glace qui couvrait autrefois une grande partie de l'Europe, ils ont pu enregistrer des faits prouvant que la glaciation n'était pas un événement dû au hasard, mais qu'au contraire, elle a eu lieu à plusieurs reprises et non seulement au cours de la période géologique actuelle, qui coïncide avec l'apparition de l'homme sur la Terre, mais aussi durant les périodes antérieures, jusqu'aux temps les plus reculés.

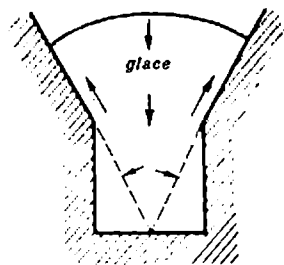


Fig. 145. Transformation d'une vallée fluviale en vallée glaciaire.

Durant la période actuelle, les glaciers firent irruption en Europe à quatre reprises. Ils apparaissaient chaque fois au nord de la Scandinavie, s'étendant progressivement à la Scandinavie et à la Finlande pour, ensuite, atteindre l'Allemagne du Nord, la Pologne, la Lituanie, la Lettonie, l'Estonie et le Nord de la Russie. Ils atteignaient un maximum de développement en parvenant à une certaine limite, puis commençaient à reculer, se réduisant de plus en plus et finissaient par disparaître pour longtemps — jusqu'à la glaciation suivante. On distingue, en Europe, quatre périodes glaciaires, qui ont été nommées en commençant par la plus ancienne: gūnziennne, mindélienne, rissienne et würmienne. Les intervalles entre ces périodes glaciaires sont appelés intervalles interglaciaires, et l'époque qui suit la dernière période glaciaire, postglaciaire.

Les limites atteintes par la glace durant les différentes époques glaciaires n'étaient pas toujours les mêmes. On considère que le glacier de la période mindélienne était le plus étendu, ceux des époques gūnziennne et rissienne un peu moins grands, et le glacier de l'époque würmienne encore plus petit. Dans les limites de la



Fig. 146. Vallée glaciaire de la rivière Tourguéni sur le versant nord du Terskéi-Alataou.



Fig. 147. Moraine frontale ancienne dans la vallée de la rivière Kara-aïry, Altaï.

plaine de Russie le glacier de la période mindélienne atteignit au sud, Kiev, Poltava, Koursk; le glacier de la période rissienne s'arrêta au sud de Moscou, celui de la période würmienne à la latitude de Moscou.

Il va de soi que les traces laissées par les glaciers les plus anciens se sont moins bien conservées que celles de la dernière période glaciaire, car non seulement les eaux courantes ont travaillé à les détruire, mais encore les glaciers postérieurs les nivelaient, les recouvraient de leurs moraines, les érodaient grâce au travail de leurs eaux de fonte. C'est pourquoi des recherches extrêmement minutieuses ont été nécessaires pour établir la limite des glaciers anciens alors que les traces laissées par les glaciers de la période würmienne se sont assez bien conservées. On peut voir leurs moraines profondes et frontales, cesars, blocs erratiques dans la plaine de Russie, près de Moscou et plus au nord, mieux encore en Carélie et en Finlande.

Les savants ont tenté de calculer la durée des périodes glaciaires et interglaciaires et ont obtenu les chiffres suivants, qui, quoique très approximatifs, nous donnent une idée de la durée de ces périodes (voir le tableau ci-dessus).

Durée des époques glaciaires
(en années)

Epoque postglaciaire	de 10000 à 20000
IV ^e époque glaciaire (würm)	52000
III ^e époque interglaciaire	65000
III ^e époque glaciaire (riss)	53000
II ^e époque interglaciaire	183000
II ^e époque glaciaire (mindel)	49000
I ^{re} époque interglaciaire	65000
I ^{re} époque glaciaire (günz)	49000
<hr/>	
Total approximatif	600000

Il faut de plus remarquer que les périodes glaciaires, loin d'être ininterrompues subissaient des variations de climat assez prononcées; les glaciers tantôt se réduisaient fortement (mais pas jusqu'à disparition complète), tantôt s'étendaient de nouveau et avançaient, autrement dit, leur marche était interrompue par des périodes interglaciaires incomplètes; c'est pourquoi à l'intérieur d'une période glaciaire on distingue des stades d'avance et de recul. Durant les périodes günzienne et mindélienne, on compte deux périodes d'avance et une de recul, dans l'époque rissienne trois périodes d'avance et deux de recul, et dans l'époque würmienne quatre d'avance et trois de recul. Ces variations de la calotte glaciaire peuvent, naturellement, être le mieux suivies dans la période würmienne, la dernière.

Les causes des glaciations. Il y a près de cent ans, que les blocs erratiques dispersés dans les champs de l'Allemagne, du Danemark, des Pays-Bas, de l'Angleterre ont pour la première fois attiré l'attention et qu'il a été établi qu'ils sont composés de roches propres à la Scandinavie et faisant totalement défaut dans les pays où ces blocs erratiques ont été trouvés (c'est d'ailleurs pourquoi ils ont été nommés erratiques); les savants ont tenté d'expliquer leur apparition par l'hypothèse des glaces flottantes. Ils croyaient qu'au début de la période géologique actuelle les mers couvraient ces pays et qu'un courant marin amenait du nord des icebergs qui se détachaient des glaciers de la Scandinavie et contenaient des matériaux morainiques. Dans la partie méridionale de la mer, plus chaude, les icebergs fondaient, et les blocs de roche qu'ils portaient tombaient au fond.

Cette hypothèse de la dérive, c'est-à-dire des glaces flottantes, avait cours dans la science jusqu'en 1860-1870, quand certains

savants, notamment le géographe et révolutionnaire russe Kropotkine, avancent l'hypothèse de glaciation continentale. Cette hypothèse parut d'abord monstrueuse, car il était difficile de se représenter que toute l'Europe jusqu'à Londres et Berlin avait été autrefois couverte de glaces. Mais peu à peu, des faits tels que les moraines, les césars, les zandres, les fronts de bélier, les roches moutonnées, que l'hypothèse de la dérive ne pouvait expliquer, ont fini par imposer à tous la théorie de la glaciation continentale.

Les observations minutieuses faites ultérieurement dans toute l'Europe et en Amérique du Nord ont montré le bien-fondé de cette hypothèse qui est devenue théorie. Mais longtemps encore les savants, acceptant la théorie suivant laquelle le nord de l'Amérique et toute l'Europe étaient couverts de glace, niaient que ce fût le cas pour le nord de l'Asie et la Sibérie, considérant que le climat y est trop continental et pauvre en précipitations atmosphériques. Cependant, il y a près de 70 ans, ce même Kropotkine a découvert en certains endroits de la Sibérie des indices de glaciation et supposé que le nord de l'Asie avait vécu, lui aussi, une période glaciaire. Sous l'influence des observations toujours plus nombreuses tous les savants finirent par accepter que la Sibérie avait été, elle aussi, couverte de glace.

Mais leurs avis diffèrent quand il s'agit d'expliquer l'origine des glaciers. Nous ne pouvons, dans ce chapitre, examiner en détails tous les points de vues et nous nous en tiendrons à l'examen succinct de quelques-uns.

Certaines explications sont fondées sur la supposition que le Gulf-Stream, courant chaud qui apporte à l'Europe la chaleur des tropiques, n'existait pas ou suivait une autre direction; d'autres tentent de trouver une explication dans le fait que les pays nordiques étant autrefois plus élevés, les précipitations atmosphériques neigeuses y prédominaient. Puis on s'est attaché à démontrer que l'écorce terrestre était moins échauffée par le soleil par suite d'une augmentation périodique de la teneur de l'air en gaz carbonique due à une activité accrue des volcans. D'autres, au contraire, expliquaient ce refroidissement par un manque de gaz carbonique, absorbé par la végétation luxuriante de la période carbonifère et tertiaire, qui a pour ainsi dire mis beaucoup de carbone en conserve dans les couches de houille. On mettait également en cause la poussière volcanique, capable de retenir et d'absorber la chaleur solaire et de provoquer un refroidissement de l'écorce terrestre.

Toutes ces hypothèses sont facilement rejetées pour une raison ou pour une autre.

Les hypothèses basées sur les données astronomiques sont mieux fondées. Ainsi, une coïncidence de l'inclinaison maximum de l'axe terrestre et de l'excentricité maximum de l'orbite terrestre peut créer dans un des hémisphères (où l'hiver a lieu quand la Terre se trouve en aphélie, c'est-à-dire est le plus éloignée du Soleil) des conditions favorables à l'apparition des glaciers : baisse de la température annuelle et prédominance des précipitations atmosphériques neigeuses. Suivant d'autres suppositions, des déplacements des pôles terrestres, autrement dit des latitudes géographiques, peuvent provoquer la formation des calottes de glaces autour de chacun des pôles, comme c'est le cas pour l'Arctique et l'Antarctique actuelles. On peut également expliquer les glaciations par un développement particulier des taches solaires pouvant provoquer un affaiblissement périodique de la radiation. L'influence de ces dernières sur le climat de la Terre est établie. On suppose, enfin, que notre système solaire se déplaçant dans les limites de l'univers, traverse périodiquement des régions saturées de poussière cosmique, qui atténue l'échauffement de la Terre par le Soleil.

Toutes ces hypothèses ont leurs partisans et leurs adversaires, mais aucune ne peut être considérée comme prouvée, et certaines, comme le développement particulier des taches solaires ou le passage à travers les nuages de poussière cosmique, ne peuvent être ni prouvées ni démenties.

La Terre a passé par des périodes glaciaires non seulement durant l'époque géologique actuelle dite quaternaire, mais également durant les époques plus éloignées. Certaines d'entre elles ont été identifiées grâce aux dépôts glaciaires fossiles découverts dans des pays aussi chauds que l'Afrique du Sud, l'Inde et l'Australie, qui n'ont pas subi la glaciation durant l'époque quaternaire. Cela complique encore la question de l'origine des calottes glaciaires, car l'opinion assez largement admise, suivant laquelle la Terre recevait, durant les périodes géologiques plus anciennes, davantage de chaleur du Soleil, avait un climat identique des pôles à l'équateur et que seule une altération progressive du climat a pu entraîner les glaciations, se trouve ainsi démentie.

Espérons cependant que tôt ou tard la science sera en mesure de déchiffrer cette grande énigme, comme elle l'a déjà fait pour bien des questions ayant trait à l'histoire de la Terre.

Tout compte fait, l'époque actuelle mérite jusqu'à un certain point la dénomination de glaciaire, surtout par comparaison avec certaines périodes de l'époque tertiaire qui l'a précédée. En effet, à l'heure actuelle dans l'Arctique, c'est-à-dire autour du pôle Nord, et en Antarctique, c'est-à-dire autour du pôle Sud, de grands espaces sont recouverts de glace et nous donnent une idée de ce qu'était l'Europe pendant les périodes glaciaires.

Dans l'Arctique une couche épaisse de glace couvre tout le Groenland à l'exception d'une étroite bande du littoral de cette grande île. Le Spitzberg, l'archipel François-Joseph, l'île Bennett, les îles de la Terre du Nord, l'île septentrionale de la Nouvelle-Zemble, l'archipel de l'Amérique du Nord sont également couverts de grands glaciers, dont beaucoup atteignent la mer et sont à la source de la formation des icebergs, montagnes de glace flottantes. Ces glaciers se déplacent comme ceux des montagnes dont nous avons déjà parlé, car ils sont alimentés par les neiges tombant à leur surface presque toute l'année. La langue du glacier atteint la mer, et de temps en temps de gros blocs s'en détachent, donnant naissance aux icebergs. Les vents et les courants marins les emportent, ils fondent très lentement, jusqu'à ce qu'ils atteignent des mers plus chaudes.

L'Antarctide est un continent entièrement couvert d'une épaisse calotte de glace, d'où n'émergent que les sommets les plus élevés des montagnes ou des chaînes montagneuses. En de nombreux endroits, la glace descend à pic vers la mer et donne naissance à de nombreux icebergs, qui sont parfois de véritables montagnes de glace en forme de table que le courant emporte loin vers le nord.

On a cependant découvert dans les îles du nord des restes de végétaux de l'ère tertiaire qui prouvent, qu'à cette époque, ces îles étaient couvertes non pas de glace mais, au contraire, de forêts composées d'arbres qui ne poussent à l'heure actuelle que dans le climat chaud du sud de l'Europe.

VII

LES PRODUITS DES ENTRAÎLLES DE LA TERRE

La chaleur de l'écorce terrestre. Les roches éruptives. Qu'est-ce que le magma. Volcans. L'éruption et ses produits. Les types d'éruptions volcaniques. Répartition des volcans sur la Terre. Les régions de volcanisme ancien. Les fumerolles et les geysers. Les éruptions dans les profondeurs de la Terre. Types de roches volcaniques. Avantages et inconvénients des volcans.

Les hommes primitifs savaient déjà que le feu sortait des divers orifices dans la terre ou sur les montagnes, et liaient naturellement ces phénomènes à l'existence d'êtres puissants ou méchants vivant sous terre. Les peuples anciens civilisés ont transporté dans les entrailles de la terre le lieu d'habitation des âmes mortes. Ils se le représentaient comme un royaume souterrain dont les Hébreux et les chrétiens ont fait l'enfer : lieu de supplice des damnés. Les Romains appelaient le souverain des enfers Pluton, les Grecs Hadès ; on le considérait, à l'origine, comme l'ennemi de toute vie. Les Romains, qui connaissaient les éruptions volcaniques sur les îles Lipari, de l'Etna en Sicile et autres, considéraient les volcans comme les cheminées des forges souterraines de Vulcain, le dieu du feu, des forgerons et des fondeurs et le dieu des incendies. C'est pourquoi on construisait les temples consacrés à ce dieu en dehors de l'enceinte des villes. Les montagnes vomissant des flammes, de la fumée, de menus débris de roches et la lave, masse liquide de roches en fusion, ont reçu, pour cette raison, le nom de volcans.

Ces montagnes nous prouvent qu'à une certaine profondeur la température de l'écorce terrestre est si élevée que les roches y sont en fusion.

Les observations faites dans les mines et les puits de forage nous montrent que la température monte au fur et à mesure que

nous descendons dans les profondeurs de la terre. En certains endroits, cette hausse de température est plus sensible, en d'autres elle l'est moins; en moyenne elle s'établit à un degré centigrade par 33 mètres de profondeur.

Le nombre de mètres qu'il faut descendre à l'intérieur de la terre pour que la température monte de 1 degré est appelé gradient géothermique.

Si l'on fixe à trente-trois mètres sa grandeur moyenne, il en découle qu'à une profondeur de 10 kilomètres la température sera déjà de 300° supérieure à celle qui règne à la surface et atteindra à 40 kilomètres de profondeur 1200° centigrades, autrement dit à cette profondeur la plupart des roches doivent se trouver en fusion. Il est vrai que l'on estime qu'avec la profondeur le gradient géothermique doit augmenter, c'est-à-dire que la température de fusion des minéraux sera atteinte beaucoup plus bas. De plus, la pression croît rapidement avec la profondeur, ce qui élève la température de fusion des roches. C'est pourquoi il est probable que même à de grandes profondeurs les roches ne sont pas encore fondues, quoique leur température soit supérieure au point de fusion. Mais si la pression baisse brusquement, ces roches peuvent fondre instantanément. Les volcans, en tant que voies de communication des entrailles de la terre avec la surface, peuvent pendant les éruptions créer ces baisses de pression dans les profondeurs qui font passer les roches à l'état de fusion.

Les roches éruptives. Le magma. L'étude des roches situées autrefois à de grandes profondeurs et se trouvant maintenant à la surface, prouve avec évidence que ces roches comprennent entre autres certaines espèces autrefois en fusion et maintenant refroidies. Toutes ces roches sont appelées éruptives, parce qu'elles ont été rejetées par éruptions; massives, car elles ne présentent pas de couches particulières aux roches sédimentaires, ou magmatiques, parce qu'elles proviennent du magma. Le mot grec "magma" signifie "pâte" et on donne ce nom aux roches qui se trouvent dans les profondeurs de la terre à l'état de fusion.

Le magma contient non seulement des matières minérales, mais aussi de l'eau sous forme de vapeur et des gaz divers. Ce fait est prouvé non seulement par les observations directes des volcans en activité et l'analyse de leurs produits; mais également par l'étude de roches éruptives d'âge différent où les analyses permettent également de déceler de l'eau et des gaz différents; on voit même

au microscope des bulles minuscules, renfermant l'eau et les gaz, incluses dans les grains des minéraux.

Les volcans. Les éruptions des volcans sont un spectacle des plus grandioses et des plus impressionnants et, en même temps, des plus terribles, que l'homme ne peut ni diriger, ni modérer, ni prévenir. Mais ces éruptions ne sont pas toutes semblables, et les observations ont montré qu'il y a plusieurs types d'éruptions. Voyons d'abord le plus commun.

Mais il faut dire, avant tout, que les volcans se subdivisent en volcans en activité, éteints et anciens. On considère comme volcans actifs ceux qui entrent ou sont en activité de nos jours ou l'ont été dans les temps historiques, alors que ceux sur l'activité desquels les hommes n'ont aucune donnée historique sont dénommés éteints. Mais il serait plus juste de les nommer volcans en sommeil ou temporairement éteints, parce que nous connaissons plusieurs exemples de volcans considérés comme éteints et qui s'étaient brusquement éveillés, comme le Vésuve en l'an 79 de notre ère et la montagne Pelée à la Martinique en 1902. Seuls les volcans qui sont déjà fortement détruits et érodés, ce qui prouve qu'ils sont inactifs depuis de nombreux millénaires, peuvent être considérés comme définitivement éteints. Ces volcans sont aussi appelés anciens.

La forme des volcans. La plupart des volcans ont la forme d'un cône tronqué ou aigu (fig. 148 et 149) avec un creux plus ou moins



Fig. 148. Le volcan Klioutchevskaja sopka, Kamchatka.



Fig. 149. Volcan Klioutchevskaïa sopka. La formation de cônes adventifs — forme la plus courante des éruptions actuelles de ce volcan. A l'arrière-plan, le panorama des volcans du Kamtchatka. Photo aérienne.

profond au sommet, appelé cratère; il a en plan une forme ronde ou oblongue et atteint en diamètre de quelques dizaines de mètres à deux, trois kilomètres et plus. Les parois du cratère du volcan sont en pente raide ou verticales. On peut voir au fond un ou plusieurs orifices, qui sont les bouches des cheminées reliant les entrailles du volcan avec le cratère (fig. 153) et sont pendant les périodes d'inaction ou de faible activité du volcan plus ou moins obstrués par les laves figées. Le cratère se transforme même assez souvent en lac. Les montagnes volcaniques sont habituellement formées, tout entières, des produits des éruptions. On voit souvent sur leurs versants les flots de lave refroidie de différents âges,

ainsi que des cratères moins importants qui ont produit des éruptions eux aussi; on les appelle adventifs. Tantôt les volcans s'élèvent isolément à de grandes distances les uns des autres, tantôt ils forment des chaînes entières ou des groupes. Certains volcans d'un seul et même groupe entrent en activité en temps différent et avec une force très diverse, alors que d'autres sont éteints depuis longtemps.

L'éruption. Les volcans en activité ne produisent pas d'éruptions continuellement et avec la même force. Quoique chaque volcan ait son caractère propre, son activité en général tantôt augmente, tantôt diminue, ce qui fait que l'on peut parler de paroxysmes,



Fig. 150. Volcan Kambalnaïa (2 160 mètres), vu du sud. C'est un volcan aux flancs lisses, à peine touchés par l'érosion; sur le versant, un large plateau de lave. Photo aérienne.

c'est-à-dire de recrudescences d'activité qui ont une durée et un caractère différents même pour un seul et même volcan. Dans l'intervalle entre les paroxysmes qui peuvent durer de quelques jours à des siècles entiers, certains volcans s'apaisent tout à fait, semblent éteints, d'autres fument légèrement par intermittences, d'autres encore produisent régulièrement beaucoup de fumée et vomissent de temps en temps des pierres et des cendres, ce qu'il faut considérer comme de faibles paroxysmes, d'autres enfin laissent tranquillement écouler leur lave.

Les paroxysmes commencent par des apparitions de fumée dans le cratère de volcans qui étaient tout à fait inactifs, et par une intensification de ces émissions pour les volcans fumant de façon régulière. Des tremblements de terre plus ou moins sensibles les précèdent ou les accompagnent; la terre tremble dans les alentours immédiats du volcan, les sources de cette région disparaissent ou ont un débit réduit, ou encore changent de composition. Ces tremblements montrent qu'un déplacement des couches de l'écorce terrestre a lieu dans les profondeurs de la terre, que de nouvelles fentes se forment ou d'anciennes crevasses se rouvrent sous la pression des gaz et des vapeurs cherchant une issue vers la surface.

La fumée sort du cratère en colonne plus ou moins large et, suivant le temps, est immédiatement détournée par le vent et forme des nuages, ou atteint une hauteur de plusieurs kilomètres et se répand en tous sens; une telle colonne de fumée a la forme d'un pin d'Italie ou pin parasol, c'est pourquoi on l'appelle piniforme (fig. 151). Cette colonne est constituée de fumée noire et de vapeur blanche, l'une et l'autre prévalant, selon le cas. La fumée contient de fines particules de roches arrachées à la lave sous la pression des vapeurs et des gaz et se refroidissant rapidement. Ces particules forment la cendre volcanique qui retombe du nuage de fumée sur les flancs du volcan ou dans la région avoisinante suivant la direction du vent. Les



Fig. 151. Eruption du Vésuve avec son panache piniforme (1822).



Fig. 152. Eruption du volcan Avatchinskaïa le 25 février 1945.
On peut voir les épais nuages de vapeur provoqués par le contact des masses en fusion et de la neige.

cendres se déposent en sable fin blanc, gris ou noir en une couche tellement épaisse parfois, que non seulement les feuilles, mais aussi les branches des arbres cassent sous son poids, les toits des maisons sont enfoncés et toute la végétation est détruite. La vapeur d'eau qui s'amasse en nuages au-dessus du volcan finit par se résoudre en pluie torrentielle accompagnée de forts orages (car les particules de cendre se chargent positivement pendant leur déplacement dans l'air, la charge des gouttes d'eau étant négative). La pluie purifie l'air des cendres, en nettoie les versants du volcan, puis dévale ses flancs en formant des torrents d'eau sale, plus exactement de boue chargée de débris et de blocs de roche arrachés aux versants du volcan. Ces torrents se précipitent vers le bas et produisent sur leur passage des dévastations importantes. A cause de leur vitesse ils sont même plus dangereux que les coulées de lave.

Avec les cendres, surtout quand la fumée est abondante, des matériaux plus grossiers sont rejetés par le volcan: le sable volcanique, les lapillis et les bombes. Les lapillis sont de menus morceaux de lave qui se sont refroidis dans l'air et dont la grosseur ne dépasse pas celle d'une noix; les morceaux de lave plus gros

sont appelés bombes. Les bombes arrachées à la lave encore chaude pendant leur trajet aérien sont tordues en spirale rappelant parfois des câbles. Le sable, les lapillis, les bombes et les éclats de roches plus anciennes arrachés aux parois de la cheminée tombent plus ou moins dru sur les versants du volcan et présentent un grand danger pour les personnes qui voudraient gravir les flancs du volcan pendant son éruption.

Les dégagements du volcan s'accroissent toujours plus et enfin, avec une forte explosion, la lave apparaît dans le cratère, l'emplît et déborde à l'endroit le plus bas, en formant une coulée qui



Fig. 153. Volcan Kéoudatch (Stubel) (893 mètres), Kamtchatka. La coupe ronde de la caldeira, de 7 kilomètres de diamètre, s'est formée à l'emplacement du sommet d'un énorme volcan dont le diamètre dépassait 20 kilomètres. Vue à vol d'oiseau.

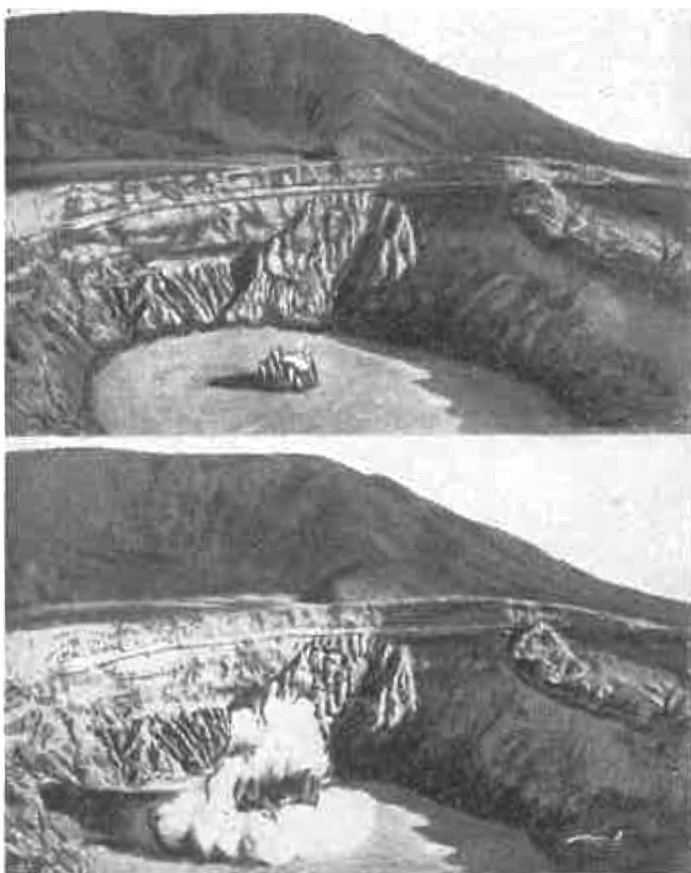


Fig. 154. Le cratère du volcan Poa à éruption en forme de geysers, Costa-Rica, Amérique centrale.

descend lentement, atteignant parfois le pied du volcan ou s'arrêtant à flanc de montagne, suivant la quantité et la composition de la lave.

Le paroxysme se termine habituellement par l'écoulement de la lave. Les dégagements de vapeurs et de gaz s'atténuent peu à peu, et après quelque temps le volcan revient à l'état habituel qu'il avait avant son paroxysme, c'est-à-dire qu'il s'apaise tout à fait ou continue à fumer plus ou moins fort!

Les produits des éruptions sont gazeux, liquides et solides. Outre la vapeur d'eau, qui entre pour une part importante dans les émanations gazeuses des volcans, ces dernières, comme le prouve l'analyse, contiennent d'autres éléments: hydrogène, chlore, soufre, azote, oxygène et carbone. Ce dernier se présente sous forme de gaz carbonique et de méthane (hydrocarbure), les autres gaz ou bien à l'état naturel, ou sous forme de combinaisons: chlorure d'hydrogène, sulfure d'hydrogène, acides sulfureux et sulfurique (anhydre), ammoniaque, chlorure et carbure d'ammonium. La vapeur d'eau et les gaz se dégagent non seulement du cratère du volcan, mais aussi sur ses flancs de la surface des coulées de



Fig. 155. Le volcan Krachéninnikov (Kamchatka) est constitué par deux volcans (volcans Nord et Sud). Un volcan récent apparaît au sommet du volcan Nord.

lave fraîche sous forme de fumerolles, s'échappant en différents endroits avec bruit et sifflements des fentes et des crevasses, en donnant naissance à de légers nuages de vapeurs et répandant une odeur suffocante de chlore, de soufre et d'ammoniaque.

Ces fumerolles s'observent également pendant les intervalles entre les éruptions et ne se dégagent des coulées de lave que tant qu'elle est encore chaude.

Les produits solides des éruptions sont le sable, les cendres volcaniques, les lapillis et les bombes; ils sont constitués ou bien de minéraux faisant partie de la lave (cendre et sable) et qui sont



Fig. 156. Bombes en croûte de pain, piriforme et torse. La première à gauche provient de la montagne Pelée.

le produit de sa pulvérisation sous l'action des gaz et des vapeurs, ou bien de morceaux de lave, arrachés par la pression et qui se sont refroidis en l'air (lapillis et bombes). La composition de ces produits durs est la même que celle de la lave dont ils proviennent. Une partie des débris durs peut être constituée des roches qui composent les parois des cheminées menant à la bouche du cratère et qui en sont arrachées par les gaz et les vapeurs.

Les produits liquides forment la lave qui s'écoule du volcan, ce qui n'a pas lieu pour toutes les éruptions; ces dernières se limitant quelquefois à un rejet de produits solides et gazeux. Par sa consistance la lave peut être plus épaisse si elle contient plus de silice ou plus liquide si sa teneur en silice est moindre. La première, à cause de sa viscosité se déplace plus lentement et donne naissance sur les versants à des coulées plus épaisses et moins étendues.

Elles sont constituées de blocs de diverse grandeur, provenant de la croûte qui se forme en cours de refroidissement de la lave et se brise en fragments. Cette lave est appelée lave en blocs ou cheire. La lave contenant moins de silice est plus fluide, coule plus vite, et elle ne se fige pas en blocs mais sa surface est marquée de plis ondulés qui, quand le courant est rapide, se recouvrent mutuellement. Cette lave est appelée lave coulée (cordée).

Il est à noter qu'un seul et même volcan peut produire lors de différentes éruptions des laves différentes, tantôt visqueuse, tantôt liquide, mais ces changements sont peu fréquents, alors que la composition des laves d'autres volcans ne varie pas.

Les cendres et le sable produits par le volcan qui se déposent sur ses versants forment d'abord une couche très meuble, qui se tasse peu à peu, devient plus compacte et se transforme en roche dure qu'on appelle le tuf volcanique. Si les cendres ou le sable tombent dans l'eau d'un lac ou de la mer, leur mélange avec les parcelles de sable, d'argile ou de limon calcaire qui se déposent dans le même bassin donne naissance à une roche d'origine mixte volcanique et sédimentaire que l'on appelle tufite. Les lapillis et les bombes font souvent partie du tuf qui se forme dans le voisinage immédiat du volcan; si ces composantes plus grossières sont abondantes le tuf est appelé brèche.



Fig. 157. Bombe géante du type "croûte de pain" sur le versant du cône Ebéko sur l'île Paramouchir, Kouriles.

Types d'éruptions. Nous avons déjà mentionné que toutes les éruptions de différents volcans n'ont pas le même caractère. Les observations effectuées en différents pays ont permis d'établir les principaux types d'éruptions ci-après :

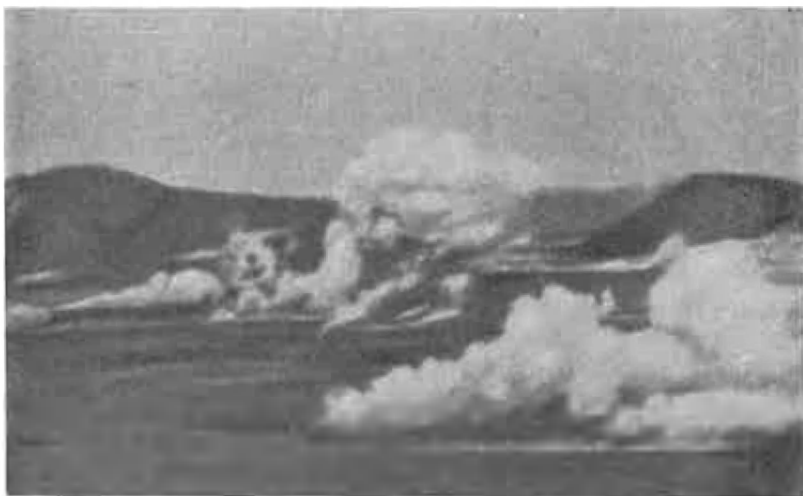


Fig. 158. Vue sur la vallée des "Dix mille fumées", Alaska.

1. Le type hawaïen est caractérisé par l'absence de dégagements abondants de gaz et de vapeurs et, par conséquent, par l'absence de cendres, de lapillis et de bombes. La lave est très fluide et coule plus ou moins régulièrement et tranquillement, presque sans explosions. Ce type d'éruption est propre aux volcans des îles Hawaï dans l'océan Pacifique, particulièrement au volcan Kilauéa. Ce volcan possède un énorme cratère plat, qui est un immense lac de lave liquide, dont se dégagent, en petite quantité, des vapeurs et des gaz produisant des fontaines de lave ondulée.

2. Le type strombolien. La lave des volcans de ce type est également fluide, mais les gaz se dégagent en abondance, ce qui entraîne de violentes explosions avec projection de bombes mais sans cendres. Les bombes sont torses ou piriformes, la lave ondulée. Ce type doit son nom au volcan Strómboli dans la Méditerranée.

3. Le type vulcanien. La lave est plus visqueuse et pour cette raison obstrue souvent la cheminée, ce qui provoque des explosions des gaz et des vapeurs qui s'accumulent et projettent

en quantités des cendres, des lapillis et des bombes. Ces dernières, vu la viscosité de la lave, ne sont pas torsées mais en croûtes de pain. Les coulées de lave sont rares et peu abondantes; elles ne s'étendent pas loin. La lave est formée de blocs. Ce type est propre aux volcans



Fig. 159. Lave ondulée, Kamtchatka.

Vulcano dans la Méditerranée et, partiellement, au Vésuve en Italie.

4. Le type peléen. La lave est très épaisse, se fige dans le cratère même et entrave le dégagement des gaz et des vapeurs; ces derniers, s'accumulant, produisent de fortes explosions et sortent brusquement sous forme d'un énorme nuage composé de gaz incandescents fortement comprimés, de vapeurs, de cendres, de lapillis et de blocs, qui dévalent la pente du volcan à une vitesse



Fig. 160. Surface d'une coulée de lave ondulée du volcan Tolbatchik, Kamtchatka.

vertigineuse, anéantissant tout ce qui vit sur son passage. Le nuage croît en même temps en hauteur formant une énorme colonne ondulée. Ces nuages sont appelés nuées ardentes. Sous la pression des gaz, la lave figée mais encore incandescente est rejetée du cratère comme un bouchon, en formant une aiguille ou un obélisque, qui se désagrège assez rapidement en perdant des blocs qui se détachent et en s'affaissant dans le cratère. Ce type a été observé pour la première fois lors de l'éruption de la montagne Pelée à la Martinique, dont la nuée ardente a détruit en quelques minutes la ville de Saint-Pierre en tuant ses 26000 habitants. Le même type a été observé plus tard lors de l'éruption d'autres volcans.

5. Le type banday-san. Lave très épaisse, ne laissant pas passer les vapeurs et les gaz, sous la pression desquels le volcan tout entier explose, et des masses de lave ancienne et refroidie depuis longtemps se trouvent projetées à l'extérieur. La lave fraîche n'apparaît pas à la surface. Ce type a été observé pour la première fois au Japon pendant l'explosion du volcan Banday-san dont une grande partie a été détruite. L'effroyable éruption du Krakatoa en 1883 près de l'île de Java, pendant laquelle la moitié de ce

volcan s'est abîmée dans la mer, appartenait probablement à ce type. Il est indispensable de noter que le même volcan ne produit pas toujours des éruptions d'un type identique; seuls les types extrêmes — hawaïen et banday-san — sont apparemment constants, alors que les éruptions des trois autres types peuvent être produites par le même volcan. Ainsi la dernière éruption du Vésuve a suivi d'abord le type strombolien, ensuite le type vulcanien et il projeta même une nuée ardente du type peléen. Il est probable, que l'éruption du Vésuve en l'an 79 de notre ère qui anéantit en un temps très court la ville de Pompéi, appartenait au type peléen. Ces variations du type d'éruption sont, manifestement, la suite des changements de la composition de la lave qui ont lieu avec le temps pour le même volcan.

Les volcans en activité du Kamtchatka et des Kouriles, les seuls en U.R.S.S., appartiennent apparemment aux types strombolien et vulcanien.

Tous ces types d'éruptions sont propres aux volcans possédant une cheminée que suivent les gaz et le magma pour déboucher à la surface en un endroit précis que l'on appelle centre. C'est pourquoi on les appelle centrales, par opposition aux éruptions de fissure se produisant à partir des fissures d'une longueur plus ou moins grande dont s'échappent les gaz et la lave, et qui sont des ruptures de l'écorce terrestre allant jusqu'à une grande pro-



Fig. 161. Crevasse Eldgja en Islande.

fondeur. Des exemples d'épanchement de fissures ont pu être observés en Islande dans les failles de Lakki, Eldgja et autres, qui atteignirent 30 à 40 kilomètres en longueur et donnèrent une énorme masse de lave qui s'est répandue largement dans la plaine.

En parlant des épanchements de lave il faut mentionner les nappes de lave. La lave qui s'écoule d'un cratère est rarement assez fluide et mobile pour atteindre les terrains horizontaux au pied du volcan où elle pourrait s'écouler en tous sens. Sur le versant, la lave coule et forme des coulées figées dont la longueur atteint parfois quelques kilomètres, rarement plus de dix ou quinze, la largeur, des dizaines de mètres seulement et l'épaisseur, vingt mètres, rarement plus. Sur une pente plus douce, la coulée atteint une largeur d'un kilomètre et plus. Sur les surfaces horizontales la lave s'étale de tous côtés et forme un revêtement occupant souvent des surfaces considérables et dont l'épaisseur peut être très grande, comme le montrent certaines régions volcaniques où la lave provenait, en majeure partie, des failles.

La quantité des produits des éruptions varie beaucoup pour le même volcan à différentes époques de son activité. Il a été établi qu'ils sont les plus abondants pour les volcans aux éruptions rares, alors que ceux qui sont presque continuellement en activité n'en donnent chaque fois que très peu. Les quelques chiffres du tableau ci-dessus donnent une idée de ces quantités.

Quantités de produits des éruptions
(en kilomètres cubes)

<i>Volcans</i>	<i>Années</i>	<i>Quantités de lave</i>
Fissure Lakki en Islande	1783	12,5
Etna en Sicile	1669	0,98
Etna en Sicile	1879	0,57
Mauna-Loa, îles Hawaï	1880	0,45
Mauna-Loa	1907	0,15

		<i>Quantités de produits meubles</i>
Timboro, île de Soumbava	1915	30
Santa-Maria, Guatemala	1902	plus de 4
Lakki en Islande	1783	2-3

On considère que depuis l'an 1500 tous les volcans de la Terre ont vomi jusqu'à 300 kilomètres cubes de produits meubles et 50 kilomètres cubes seulement de lave.

L'orientation des torrents de lave sur les flancs des volcans est habituellement très irrégulière et dépend de l'état des parois du cratère et de l'emplacement de l'échancrure, d'où la lave déferle. La lave peut s'écouler pendant de longues années par le même endroit; une forte explosion pendant une éruption peut former une nouvelle échancrure qui laissera la lave se répandre sur un autre versant. De plus la lave s'écoule souvent non pas du cratère principal, mais d'une cheminée adventive sur le flanc du volcan. En ce cas le torrent de lave peut atteindre les agglomérations et les surfaces cultivées se trouvant au pied du volcan, alors que les torrents issus du cratère principal ne les atteignent que très rarement, car ils ont le temps de se figer avant même d'avoir quitté le versant. Ainsi, lors de l'éruption de l'Etna en 1928, la lave issue d'une cheminée adventive sur le versant est coupée une ligne de chemin de fer qui suivait le pied de ce volcan et inonda les rues, les maisons et les jardins de deux bourgades.

La composition du cône volcanique dépend des produits d'éruption. Les volcans qui ne produisent que de la lave sont constitués exclusivement de couches de lave de différents âges. La plupart des volcans sont constitués de coulées de lave solidifiée alternant avec des couches de tufs, et de brèches édifiées par le tassement des produits meubles (fig. 162). Les cônes des volcans qui ne rejettent que des produits meubles sont entièrement composés de tufs et de brèches.

La répartition des volcans sur la Terre est extrêmement irrégulière, et des régions étendues, des continents entiers en sont absolument dépourvus. Ainsi, par exemple, il n'y a pas du tout de volcans sur le continent australien; ils sont concentrés, en Asie, sur la presqu'île du Kamtchatka et sont absents des autres régions, sauf un groupe dans le nord-est de la Chine (Tounpéi); il n'y a en Europe qu'un seul volcan, en Italie; ils sont assez nombreux en Afrique. Les îles des océans Pacifique et Indien, en partie de l'Atlantique et de la Méditerranée, et surtout les deux Amériques, sont les plus riches en volcans. Mais si l'on tient compte des volcans éteints ayant travaillé durant les temps historiques et des régions de volcanisme plus ancien, cette irrégularité dans la répartition des volcans disparaît, car il sera impossible de trouver une région tant soit peu étendue qui soit privée de volcans, tout au moins anciens.

La région où les volcans en activité sont les plus développés est l'océan Pacifique; de nombreux volcans bordent ses côtes

dans les deux Amériques, passant de l'Alaska par les Aléoutiennes au Kamtchatka, de là par les Kouriles au Japon. On en trouve sur toutes les îles de l'archipel de la Sonde, en Nouvelle-Zélande, dans l'Antarctide et sur certaines îles, comme les Hawaï et Samoa. L'océan Pacifique est entouré d'une ceinture de feu; si l'on y ajoute les volcans voisins des îles de la Sonde dans l'océan Indien, le nombre des volcans en action de ce cercle est supérieur à quatre cents.

L'océan Atlantique peut être classé en deuxième place avec la mer des Antilles et la Méditerranée. Ici les volcans sont isolés ou dispersés en petits groupes et non pas en chaînes, comme dans la ceinture de feu. Il y en a en Islande, dans les Açores,

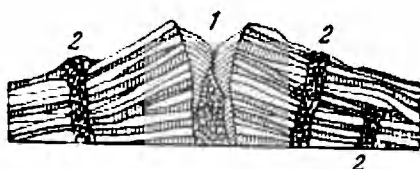


Fig. 162. Coupe du cône d'un volcan, formé de couches de tufs et de coulées de lave, traversées par les canaux des cratères principal (1) et adventifs (2).

les îles Canaries, au Cap-Vert, dans les Petites Antilles, en Sicile, dans les îles Lipari, en Italie et dans l'archipel grec en Méditerranée. Il y a quelques dizaines de volcans en activité dans cette région.

En troisième place vient l'Afrique, où il y a un volcan sur le littoral et plusieurs à l'intérieur, le long de la chaîne des grands lacs.

D'après le dernier recensement des volcans ayant subi des éruptions depuis l'an 1500, il y en a 403 dans les régions baignées par le Pacifique et 83 dans l'hémisphère atlanto-indien, en tout 486. Si l'on tient compte des éruptions connues plus anciennes, on arrive à un total de 522 volcans.

L'étude de la structure de l'écorce terrestre a permis aux savants de déduire que l'apparition des volcans se trouve en liaison directe avec des perturbations sensibles de la stratification originelle de cette écorce. Ces perturbations se manifestent, comme nous le verrons dans le chapitre suivant, en premier lieu par une forte compression de ses couches qui provoque des plis, semblables à ceux que forme une nappe si nous la ramassons d'un côté avec la main, et en second lieu par la rupture de ces couches par de grandes failles dues à l'extension trop grande de ces couches. Les volcans en activité sont justement situés dans les régions de la terre où l'écorce terrestre a été récemment soumise à de forts

plissements ou à des ruptures importantes. Les uns et les autres peuvent d'ailleurs se combiner. Ainsi, sur le littoral du Pacifique, les plissements jeunes s'accompagnaient de nombreuses ruptures, et les grandes fosses océaniques voisinent avec les chaînes de montagnes plissées qui bordent la côte. Les volcans de la Méditerranée et de la mer des Antilles sont également disposés dans une région de jeunes plissements accompagnés de failles profondes. Les volcans du centre de l'Afrique coïncident avec une chaîne plissée récente qui se termine au nord par la mer Rouge et la dépression de la mer Morte avec la vallée du Jourdain. Les lois suivant lesquelles se répartissent les volcans de l'océan Atlantique sont moins nettes, et l'on ne peut que supposer une intersection de chaînes de plissements et de failles plus anciennes avec de plus jeunes. L'origine des volcans des îles Hawaï, trop éloignés des plissements et des failles côtiers, n'est pas éclaircie.

Les régions de volcanisme ancien confirment la loi générale de répartition des volcans. Ces régions sont d'un âge très variable. Certaines d'entre elles possèdent des volcans qui étaient encore en activité au début de l'époque géologique actuelle, probablement même sous les yeux des hommes primitifs. Sur ces volcans, les



Fig. 163. Volcan Santa-Maria avec la couche de cendres éjectées lors de l'éruption de 1902, Guatemala, Amérique centrale.

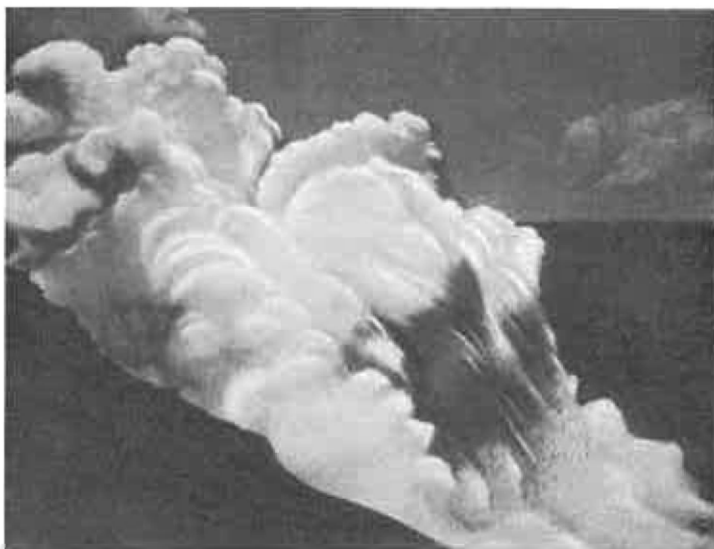


Fig. 164. Epanchement de lave dans la mer. Volcan Matavanou, île Savaii, océan Pacifique.

plus jeunes parmi les anciens, les cônes de forme caractéristique ont un cratère au sommet, qui est souvent un lac, et les coulées de lave projetées de ces cratères se sont conservées. Ainsi, notamment, les sommets les plus hauts du Caucase, le Kazbek, l'Elbrouz et certains autres, l'Ararat en Turquie, l'Alagueuse et autres en Arménie, le Demavend en Iran, les petits volcans Lopatine, Mouchkétov et Obroutchev sur le plateau Vitime, les volcans Pérétoltchine et Kropotkine dans les Saïans orientaux. Les volcans d'Auvergne en France, le Monte Nuovo et les Champs Phlégréens en Italie, le Drachenfels et les maare de l'Eifel en Allemagne sont également des plus jeunes parmi les zones de volcanisme ancien. Nous en trouverons également en différents endroits de la République populaire de Mongolie (par exemple, les volcans de la région de Darigan et le volcan Cléménz dans les contreforts du Khangai), en Chine méridionale, en Inde du Nord, en Australie, en Asie mineure, etc. Dans le Thourpéi, dans le groupe de volcans Youn-Kholdongi près de la ville de Mergen, d'après les manuscrits chinois, des éruptions ont eu lieu en 1724 de notre ère.

Des régions volcaniques plus anciennes sont réparties irrégulièrement dans tous les continents; les formes volcaniques y ont beau-

coup souffert de l'érosion et seules des ruines de montagnes volcaniques et des restes de coulées de lave et de revêtements volcaniques ont subsisté (fig. 165). Des restes encore plus anciens se sont conservés où nous ne trouvons que les parties internes des volcans et des canaux emplis de magma. On en trouve dans l'Oural, le bassin du Donetz, en Volynie, dans la région nord du Caucase près de Piatigorsk, dans les Alpes et dans les Carpathes, dans les Balkans, le Tibet, en Altaï, dans les Saïans, dans la Transbaïkalie, la presqu'île de Tchoukotka, sur l'Amour et sur tout le littoral est de Vladivostok à la rivière Anadyr. En Sibérie moyenne, entre la Léna et l'Énisséï, dans la partie septentrionale du bassin de la Toungouska, on trouve un énorme bouclier de lave qui s'épanchait principalement par les fissures; au sud et à l'est de ce bouclier une surface immense est occupée par des tufs volcaniques, provenant d'une grande quantité de volcans et de cheminées d'explosion. Le plateau du Deccan avec ses nappes de lave est aussi une région volcanique ancienne. Les îles de l'Arctique — le Spitzberg, l'archipel François-Joseph, le Groenland — abondent en revêtements de lave couvrant des couches considérables de roches sédimentaires et alternant parfois avec ces dernières.

Toutes ces régions de volcanisme ancien se trouvent étroitement liées aux zones de plissements accentués ou de failles de



Fig. 165. Alternance de laves et de tufs, Borjomi, Caucase.



Fig. 166. Solfatares dans le cratère du volcan Ebéko, île Paramouchir, Kouriles.

l'écorce terrestre. Le long des fissures apparaissent des chaînes de volcans en activité où les épanchements de lave avaient lieu par les fissures. Dans certaines régions, les plus jeunes, les derniers échos de cette activité volcanique se manifestent encore sous forme de sources chaudes qui montrent que le foyer volcanique, le réservoir de magma, n'est pas encore tout à fait refroidi dans les profondeurs et l'eau juvénile continue à s'en dégager. Ces indices de volcanisme éteint sont, par exemple, les sources chaudes sur les bords du lac Baïkal et dans la taïga de Bargouzine, à Karlovy-Vary en Tchécoslovaquie, à Piatigorsk et Borjomi dans le Caucase, à Kissingen en Allemagne, en Auvergne en France, Demavend en Iran, et d'autres. Non seulement les sources chaudes, mais aussi les sources minérales froides sont des réminiscences d'une ancienne activité volcanique.

Les observations des volcans actuels ont montré que quand le volcan s'éteint après une forte éruption et que ses fumerolles se refroidissent, les gaz qui s'en dégagent deviennent moins variés et même le centre principal ne laisse échapper que les gaz carbonique et sulfureux ainsi que la vapeur d'eau. Les volcans qui

se trouvent dans cet état sont appelés solfatares (fig. 166). Puis, le processus d'extinction se poursuivant, les volcans ne dégagent que du gaz carbonique et des hydrocarbures sous forme de mofettes, comme on les appelle. C'est pourquoi on peut considérer les eaux minérales chaudes et froides des régions de volcanisme ancien comme des eaux juvéniles et non pas comme des eaux vadoses échauffées et minéralisées dans les profondeurs.

Une des régions volcaniques les plus remarquables et relativement jeunes est le Parc National du Yellowstone dans les montagnes Rocheuses aux Etats-Unis. La rivière Yellowstone a creusé un défilé dans une énorme épaisseur de lave et de tufs volcaniques provenant des éruptions anciennes (fig. 167) et où sont ensevelis des restes d'arbres répartis sur quinze étages. Quinze fois cette région a été couverte de grandes forêts aux arbres centenaires, et quinze fois le volcan voisin les a ensevelies sous les cendres et sa lave. Beaucoup d'arbres se sont pétrifiés en pleine croissance et ont conservé leur position verticale, d'autres ont été abattus. Cela prouve que des éruptions volcaniques catastrophiques ont eu lieu ici à quinze reprises, après quoi des siècles entiers ont dû



Fig. 167. Le canyon de la rivière Yellowstone, Etats-Unis, atteignant une profondeur de 360 mètres, creusé dans les couches de laves et de tufs.

s'écouler avant qu'une nouvelle forêt ait pu croître sur cet emplacement (fig. 168).

Dans ce même Parc National nous trouvons d'autres preuves d'une activité volcanique récente sous forme de geysers.

Les geysers sont des sources chaudes jaillissant par intermittence sous forme de jets d'eau plus ou moins hauts. On les

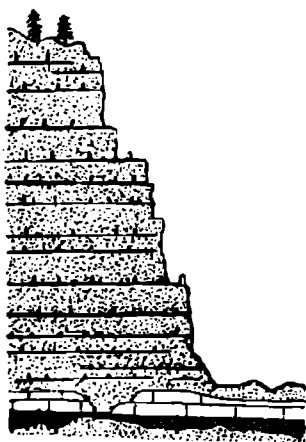


Fig. 168. Coupe des couches de tufs et de laves avec 15 horizons de forêts ensevelies du parc National du Yellowstone, Etats-Unis.

trouve seulement dans les régions volcaniques, tant actuelles (Kamtchatka, Islande, Nouvelle-Zélande) que plus anciennes (Parc National du Yellowstone). Certains geysers surgissent d'orifices situés au fond de bassins, d'autres de fentes dans les tufs siliceux qui sont des dépôts de ces geysers. Les éjections des geysers ont lieu à des intervalles irréguliers, constants pour chaque source: toutes les dix ou vingt minutes pour les uns, avec des intervalles de plusieurs heures pour d'autres, toutes les vingt-quatre heures pour certains. Ces éjections sont précédées par des chocs souterrains et dans les bassins par un bouillonnement de l'eau. Puis un jet d'eau apparaît pour un temps variable. La température de l'eau qui contient principalement de la silice en solution varie de 60 à 99° C. Ces dépôts de silice édifient autour de la

source des cônes irréguliers de faibles dimensions ou des bassins entourés de terrasses par lesquelles l'eau s'écoule et qui croissent en épaisseur. Le geyser principal de l'Islande, le Grand Geyser, se manifeste toutes les 24-30 heures; en Nouvelle-Zélande, des dizaines de geysers sont en action dans la vallée de Waikato, autour du lac Rotomagan; le geyser le plus important, Tétarata, a déjà édifié toute une série de terrasses blanches de tufs siliceux. Il y a dans le Parc du Yellowstone plusieurs dizaines de geysers de grandeurs différentes et portant chacun leur nom (fig. 169). Au voisinage de certains geysers, les zones forestières dont le sol s'imbibe d'eau minérale périssent peu à peu; les arbres sur pied absorbant de la silice se pétrifient.

En 1941, de grands geysers ont été découverts dans le Kamtchatka près du volcan Kikhpinytch, dans la vallée de la rivière Geysernaïa.

Il y a plus de vingt grands geysers dans cette région dont le plus important, nommé le Géant, lancé un jet d'un diamètre de trois mètres à la base (au griffon) à une hauteur atteignant



Fig. 169. Geyser Old Faithful, Parc National du Yellowstone, Etats-Unis, fuse toutes les 70 minutes jusqu'à une hauteur de 40 mètres.

quarante mètres, la vapeur montant par moments jusqu'à plusieurs centaines de mètres (400 à 500).

Le régime des geysers du Kamtchatka est varié. Certains d'entre eux sont caractérisés par de longues accalmies, d'autres, au contraire, par une longue période d'activité et de courts intervalles d'inaction.

La durée d'un cycle entier, c'est-à-dire d'activité et de calme consécutifs, varie pour les geysers du Kamtchatka de deux minutes

et demie à cinq heures. L'eau et la vapeur s'échappent pendant une à douze minutes. La hauteur du jet est de 1 à 40 mètres. La température de l'eau varie de 94 à 99° C.

La plupart des geysers se distinguent par une grande irrégularité d'activité. Dans le Kamtchatka, leur précision est de 20-40 %, et ils sont cependant, par rapport aux autres geysers du globe, des plus réguliers.

Le régime des geysers change avec le temps, les périodes d'activité augmentent généralement.

Les intrusions. Le magma qui monte des entrailles de la terre n'atteint pas toujours la surface pour former un volcan et provoquer des éruptions. A en juger par la masse des roches magmatiques, les dégagements de magma qui n'a pu déboucher et est demeuré à une certaine profondeur en produisant les intrusions, ont une importance bien plus grande, car le magma s'introduit entre les couches de l'écorce terrestre en profitant parfois des vides existants, mais plus souvent en se faisant place par soulèvement et écartement des couches qui fondent sous l'action de sa chaleur.

Les intrusions ont des formes et des dimensions diverses. Les plus grandes, occupant des surfaces de quelques dizaines à plusieurs centaines de kilomètres (avec un volume en conséquence) sont



Fig. 170. Bassin de la source bouillante "l'Eponge", Parc National du Yellowstone, Etats-Unis.



Fig. 171. Terrasses de Cléopâtre formées par des dépôts de tufs siliceux avec des algues de couleurs verte, orange et brune, Yellowstone, Etats-Unis.

appelées batholites ; elles ont en plan une forme allongée ou arrondie avec des apophyses et des creux ; leur face supérieure est inégale, avec des irrégularités en forme de dômes. Des portions plus ou moins importantes des roches sédimentaires ou des blocs isolés, qui forment la voûte du batholite, se trouvent plongées dans la masse du batholite lors de l'intrusion du magma et constituent les xénolites. Les batholites de dimensions réduites, de centaines et de milliers de mètres carrés, sont appelés stocks.

La lave soulève souvent une couche de l'écorce terrestre en donnant naissance à une coupole et se fige, en adoptant une forme qui rappelle une miché de pain, et qu'on appelle laccolite ; au fond de celui-ci il y a toujours un canal que suit le magma lors de son ascension. Les laccolites ne peuvent apparaître que non loin de la surface de la terre, entre des couches horizontales ou de faible inclinaison qui peuvent être soulevées sous la pression du magma. On peut voir dans le toit du laccolite, quand ses couches sont minces, des intrusions de magma qui suivent les strates parfois sur des étendues considérables. On peut considérer les laccolites comme des volcans avortés, l'ascension des magmas s'étant arrêtée à ce stade sans avoir pu déboucher au jour ; d'autre part, il est possible qu'un laccolite se trouve à une certaine pro-

fondeur sous les volcans en activité et sert de réservoir volcanique d'où les masses en fusion viennent s'épancher. La figure 181 représente un laccolite (la montagne Aïou-Dagh) mis à jour par l'érosion.

La région des Eaux Minérales dans le Caucase présente un exemple caractéristique de laccolites; nous y trouvons toute une série de montagnes isolées, dix-sept en tout. Certaines d'entre elles sont des laccolites déjà endommagés par l'érosion comme le

Bechtaou, la Zmievka, la Razvalka, la montagne de Fer, le Chameau, le Bœuf, où les roches éruptives apparaissent à la surface, alors que d'autres, comme le Machouk, le mont Chauve, l'Ioutsa, le

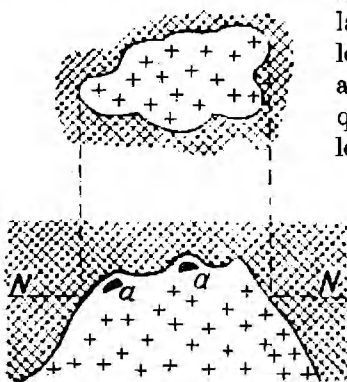


Fig. 172. Coupes d'un batholite: verticale (bas) et horizontale (haut) au niveau de la ligne NN; a — xénolites.

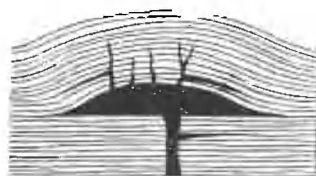


Fig. 173. Coupe idéale d'un laccolite avec filons transverses et veines interstratifiées dans la voûte.

Svistoun sont des laccolites encore dissimulés sous des roches sédimentaires soulevées en forme de dômes. La figure 174 représente une coupe des montagnes Bechtaou (1), de la montagne de Fer (2) et de la Razvalka (3) où nous voyons que l'intrusion du laccolite dévie et retourne même parfois les couches. Le laccolite commun des montagnes de Fer et Razvalka possède deux sommets entre lesquels on voit un reste de la voûte. L'intrusion n'était sans doute pas aussi calme que le représente la coupe idéale (fig. 173). Les sources minérales chaudes et froides qui font la renommée de cette contrée sont les derniers échos de cette intrusion, morte depuis longtemps et qui n'a pas formé ici de volcans. Mais non loin de là, plus au sud, nous trouvons l'Elbrouz, énorme volcan qui, de toute évidence, a été encore en activité quand l'homme avait déjà fait son apparition, si l'on en juge par la légende de

Prométhée, qui, ayant volé le feu du ciel, a été enchaîné en punition par les dieux au sommet de cette montagne.

Outre les batholites et les laccolites, les intrusions comprennent d'autres formations plus ou moins complexes; notons les filons, formation la plus fréquente qui, ou bien coupent les strates au hasard et sont appelés transverses, ou bien leur sont parallèles et sont dénommés filons-couches (fig. 177). On distingue dans le filon l'éponte supérieure ou toit (*t*) et l'éponte inférieure ou mur (*m*); sa puissance qu'on mesure perpendiculairement aux épontes varie dans de très larges limites, d'un centimètre à des



Fig. 174. Coupe de laccolites (1, 2, 3) des monts Bechtaou, Jéleznaja (montagne de Fer) et Razvalka, mis à nu par l'érosion, Eaux Minérales du Caucase.

dizaines et même deux centaines de mètres. Certains filons sont courts, d'autres s'allongent sur des centaines de mètres ou des kilomètres.

Les filons se gonflent souvent, autrement dit, augmentent en épaisseur ou s'amincissent en formant des étranglements. Ils partent tant des batholites que des laccolites, ainsi que des volcans, plus précisément de leur cheminée, et remplissent de magma les fissures (filons transverses) ou s'introduisent entre les strates.

Les types de roches éruptives. Le magma qui s'est consolidé sous forme de batholites, de laccolites et de filons, de coulées et de revêtements de lave, constitue des roches dites éruptives ou magmatiques, comme nous l'avons indiqué au début de ce chapitre. Ces roches sont très diverses tant par leur structure que par leur composition. L'étude de ces roches, ainsi que des roches sédimentaires, est l'objet de la pétrographie, branche importante de la géologie; nous ne pouvons donner ici que des notions très générales quant à leur composition et à leur texture.

On classe tout d'abord les roches éruptives d'après leur teneur en silice, en trois grandes catégories: les roches acides, renfermant plus de 65% d'oxyde de silicium, les roches neutres (entre 52

et 65%), les roches basiques (entre 42 et 52%) et les roches ultra-basiques (moins de 42%).

Suivant le mode de gisement on distingue: a) les roches intrusives, ou de massifs, ou encore de profondeur, qui se sont solidifiées en profondeur et ont, de ce fait, une texture grenue; b) les roches effusives ou d'épanchement (ou encore volcaniques, laviques ou extrusives), apparues à la surface par les cheminées des volcans ou les fissures, et cristallisées à la pression atmosphérique; c) les roches de filons qui sont des magmas consolidés dans les fissures de la croûte terrestre à différentes profondeurs.

Du point de vue texture, on distingue les roches suivantes:

1. Les roches holocristallines-grenues ou à cristallisation totale, qui se forment lors d'un refroidissement lent du magma en profondeur et où tous les minéraux se répartissent régulièrement, sous forme de cristaux ou de grains, de dimensions à peu près égales. Citons en exemple le granit, roche acide, la diorite et la syénite, roches neutres, les gabbros, comme roches basiques et les péridotites, ultra-basiques.

Le granit est constitué de quartz, de feldspaths et de mica, qui peut être accompagné ou remplacé par l'amphibole, rarement par l'augite.



Fig. 175. Volcan de scories du quaternaire inférieur sur le plateau Kyzyl-djouk (Haut-plateau de l'Arménie) avec cône secondaire dans le cratère.

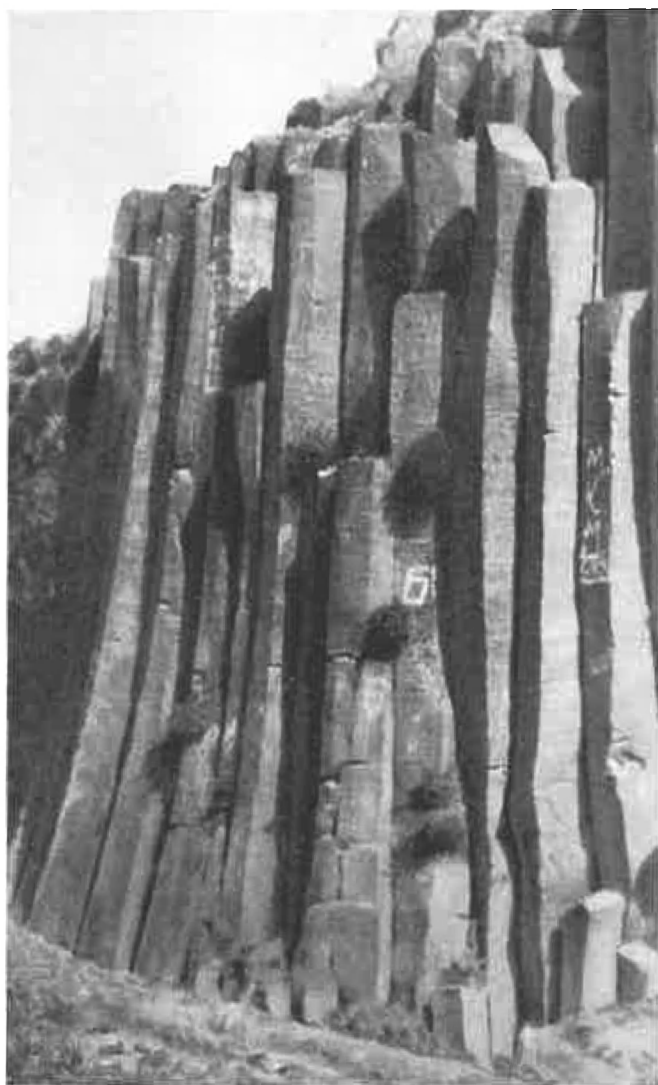


Fig. 176. Orgues de basalte des environs d'Erévan. Couches quaternaires.

La diorite et la syénite sont formées par les feldspaths et le mica (ou l'amphibole, l'augite); la différence provient de la composition du feldspath: potassique pour la syénite et calco-sodique pour les diorites.

Les gabbros sont constitués de feldspath calco-sodique, de pyroxène (diabase, augite, hypersthène) et d'olivine.

Les péridotites comprennent de l'olivine et de l'augite avec, parfois, une adjonction d'amphibole, de mica.

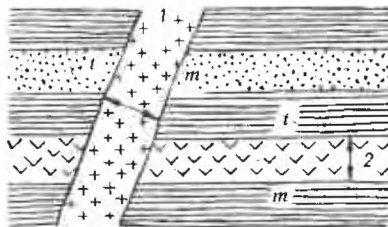


Fig. 177. Filon transverse (1)
et filon-couche (2); t — toit,
m — mur.

2. Les roches porphyriques se forment à une faible profondeur ou en surface lorsque le refroidissement est assez rapide. On y voit des grains ou de gros cristaux qui se sont consolidés, alors que le reste de la roche s'est solidifié en une masse microgrenue contenant souvent encore du verre en quantités plus ou moins grandes. Quand la lave se refroidit si vite que les minéraux n'ont pas le temps de se cristalliser, c'est le verre volcanique qui se forme, c'est une masse plus ou moins transparente de couleurs diverses ressemblant au verre artificiel.

Citons comme exemple des roches porphyriques acides le porphyre quartzifère, qu'on appelle aussi rhyolite ou liparite; parmi les roches neutres les trachytes et les dacites; les andésites, les porphyrites et le basalte sont les roches basiques; et le porphyre picritique, ultra-basique. La composition de ces roches est la même que celle des roches holocristallines déjà citées (par exemple, le porphyre quartzifère et la liparite correspondent au granit, le trachyte à la syénite, le porphyrite et l'andésite à la diorite, etc.), mais la texture en est autre, les conditions de solidification étant différentes.



Fig. 178. Filon de pegmatite mis à nu par suite de la destruction des schistes qui l'entouraient. Chaîne du Turkestan.



Fig. 179. Filon de roche éruptive, Kara-Dagh, Crimée.

3. Les roches vitreuses ou bien sont entièrement constituées de verre, ou bien c'est une pâte vitreuse contenant quelques minéraux cristallisés. Exemples: le vitrophyre (porphyre vitreux), le vitrobasalte (basalte vitreux), l'obsidienne, la ponce, le pechstein qui sont complètement à l'état vitreux, de composition semblable à la liparite et à la dacite.



Fig. 180. Filon de diorite dans le granit blanc traversant des gneiss gris (à droite). Fosse de la source Lobatchen, désert Pé-chan, Asie centrale.

On distingue encore les roches bulleuses, en tant que variétés des porphyres, et les roches vitreuses, riches en espaces vides de différente grandeur qu'y ont laissés les gaz en s'échappant de la lave. Suivant les dimensions et la forme de ces cavités, on distingue les textures spongieuse, bulleuse, poreuse et microporeuse qui sont en général propres aux roches effusives.

Le lecteur peut demander, pourquoi les roches porphyriques, correspondant par leur composition au granit, sont appelées porphyres quartzifères et liparites, et en quoi les premiers se distinguent des secondes. C'est que parmi les roches de ce type on distingue les récentes des anciennes, ou les plus altérées et les plus fraîches. Les porphyrites et les porphyres quartzifères se rapportent aux premières, alors que les liparites, les trachytes, les andésites et les basaltes se rattachent aux secondes.

Les roches plus anciennes sont caractérisées par leur compacité; elles ont déjà pu subir différentes modifications sous l'action de divers agents chimiques et physiques; les petites pores qu'elles comportaient et qui étaient produites par les gaz en voie de dégagement ont disparu. Certaines espèces récentes comportent un feldspath vitreux (la sanidine) qui fait défaut dans les anciennes. Le verre de ces dernières s'est déjà décristallisé pour une grande part.

Dans la plupart des cas il est facile de distinguer les porphyres anciens des récents.

Il faut dire encore quelques mots des roches métamorphiques qui se forment dans les profondeurs au contact des intrusions. La chaleur que dégagent ces dernières en se refroidissant, ainsi que les vapeurs et les gaz, provoquent des modifications plus ou moins profondes des roches sédimentaires allant de la formation de roches nouvelles jusqu'à une recristallisation complète des roches sédimentaires, qui se transforment ainsi en roches cristallines. Les pressions considérables régnant dans les profondeurs, ou provoquées lors de la formation des chaînes montagneuses, les hautes températures et les solutions qui baignaient les roches sont les agents du métamorphisme.

Exemples de roches métamorphiques: les gneiss, les quartzites, les schistes cristallins, les marbres. Le gneiss, dont la composition est la même que celle du granit, s'élabore à partir des roches sédimentaires entièrement recristallisées, et on l'appelle alors paragneiss, ou encore, lorsqu'une masse intrusive, se refroidissant sous pression lors de la formation des montagnes, reçoit une structure schisteuse et se transforme en orthogneiss. Le marbre est un dérivé des calcaires et des dolomites; les schistes cristallins, les



Fig. 181. Laccolite mis à nu par l'érosion, montagne Aiou-Dagh (à l'arrière plan). Côte Sud de la Crimée.

amphibolites, les micaschistes, les chloritoschistes se forment à partir de roches sédimentaires différentes.

L'étude des volcans est une tâche intéressante mais extrêmement ardue à certains égards. Il n'est évidemment pas plus difficile d'étudier les volcans éteints depuis longtemps et fortement érodés, que n'importe quel affleurement de roches; on peut de cette façon avoir une idée de la structure interne du volcan, de sa composition, de la forme de la cheminée et de la façon dont elle se remplit, de l'agencement des minéraux entre eux et du mode de répartition des couches.

Les batholites et les laccolites mis à nu par l'érosion permettent d'étudier la composition et la structure de ces manifestations souterraines du volcanisme, d'élucider les processus de leur inclusion dans les couches de l'écorce terrestre, de leur solidification et de leur influence sur les roches adjacentes. Mais le phénomène du volcanisme proprement dit dans ses diverses manifestations et dans toutes les phases de son développement ne peut être étudié que sur les volcans en activité, et là cette étude se heurte à d'énormes difficultés sous la forme de gaz asphyxiants ou empoisonnés, de vapeurs d'eau chaudes, de nuées ardentes et de bombes incandescentes.

Néanmoins, des progrès considérables ont été réalisés dans l'étude des volcans dès le début du XX^e siècle. Tout d'abord, des savants américains ont pénétré dans le vaste cratère du volcan Kilauéa dans les îles Hawaï et, au risque de leur vie, ont mesuré la température de la lave en fusion; ils en ont pris des échantillons, ont recueilli des prises des émanations gazeuses. L'analyse des gaz a permis d'établir leur composition chimique, notamment la part des vapeurs d'eau, problème qui donnait lieu à de nombreuses controverses. Puis on a commencé à descendre dans le cratère du Vésuve et du Stromboli; le savant Mercalli périt dans le premier; dans le second, Kerner, suspendu à l'extrémité d'une corde, a atteint une profondeur de 250 mètres. Un savant et un journaliste japonais descendirent dans le cratère du volcan en activité Miha-ra-yama près de Yokohama à bord d'une nacelle d'acier à refroidissement artificiel. Les deux observateurs étaient munis de scaphandres en amiante et des masques à gaz. Jusqu'à une profondeur de 150 mètres la visibilité était suffisante, on pouvait observer la lave en ébullition et les explosions de gaz, et prendre des photos. Trente mètres plus bas la visibilité se réduisit au point qu'on ne pouvait plus continuer la descente qu'au juger. A 370 mètres la nacelle

était si fortement secouée par les explosions de gaz qu'il devenait dangereux de continuer la descente, et force fut aux observateurs de donner le signal de la remontée. Les échantillons de gaz et plusieurs centaines de clichés photographiques couronnèrent la visite du cratère.

Après plusieurs tentatives infructueuses une descente dans le cratère du volcan Klioutchevskaja dans le Kamtchatka, volcan très élevé, a pu être réalisée. En 1935, le géologue Koulakov, le

Fig. 182. Rocher Shiprock, vestiges du cratère d'un volcan ancien composé de laves et de brèches-tufs, région de Navajos, Arizona, Etats-Unis.

chimiste Trotski avec l'ouvrier Mikouline et l'alpiniste Koptélov ont visité le cratère, recueilli des gaz et observé des dégagements de fumée et des projections de bombes et de lapillis.

Les Américains ont depuis longtemps déjà mis sur pied une station d'observation sur le volcan Kilauéa et les Italiens, sur le Vésuve.

La station volcanologique de l'Académie des Sciences de l'U.R.S.S., aménagée en 1935 près du volcan Klioutchevskaja, le plus actif des volcans du Kamtchatka, étudie l'activité volcanique dans ses diverses manifestations: mécanisme des éruptions, état du volcan durant les intervalles entre les éruptions, fumerolles et solfatares, geysers et sources chaudes.

On prête une grande attention à l'étude des indices prééruptifs en vue d'alerter à temps la population.

Depuis que cette station existe des éruptions des volcans Chivéloutch, Klioutchevskaïa, Tolbatchik, Maly Sémiatchik, Karym, Joupanovski, Avatchi, Moutnovski, Sarytchev et du pic Krénitsine ont été observées et étudiées.

On y étudie, en outre, les produits volcaniques (les laves et autres roches éruptives, les minéraux, les sublimations et les gaz volcaniques, principalement les fumerolles), ainsi que les formes de volcans et autres objectifs. Jusqu'à présent ces observations et études ont été publiées dans 23 fascicules du *Bulletin de la station volcanologique du Kamtchatka* et dans les neuf volumes des *Travaux de la station volcanologique du Kamtchatka*.

Avantages et inconvénients des volcans. On a remarqué depuis longtemps que les roches éruptives érodées forment, en se décomposant, un sol très fertile. C'est pourquoi les versants et les alentours des volcans en activité, quand le climat s'y prête, attirent une population nombreuse qui cultive la terre, malgré la menace constante d'une récurrence d'éruption. Les cendres éjectées par le volcan sont un engrais pour les champs et les jardins, à condition de ne pas tomber en quantités capables d'étouffer la végétation.

Les dépôts de pierre ammoniacale et surtout de soufre dans le cratère des volcans sont une source d'exploitation, souvent périlleuse pour les ouvriers.

Les sources minérales des volcans tant actifs qu'éteints sont de longue date utilisées par l'homme à des fins de traitement médical. Le beau spectacle des geysers en activité attire les touristes.

Les émanations de gaz carbonique en certains endroits sont captées pour l'obtention de gaz carbonique liquide. Le captage de l'acide borique dans le Vulcano s'effectuait jusqu'à sa dernière éruption pendant laquelle l'appareillage a été détruit. Les fumerolles et sources chaudes de Soffioni en Toscane (Italie), contenant de l'acide borique, ont une grande importance; elles furent utilisées dès 1818, et ces derniers temps on utilise l'énergie thermique des fumerolles non seulement pour l'extraction de l'acide borique, mais pour la transformer en énergie mécanique et électrique. A l'aide de puits de forage d'une profondeur de 60 à 1561 mètres, on capte à l'heure 3000 tonnes de vapeurs à une température de 100 à 240° C. La vapeur contient jusqu'à 6% de gaz, surtout carbonique (90%), ainsi que du sulfure d'hydrogène, du méthane, de l'ammoniac, de l'azote, de l'argon et de l'hélium. Des usines extraient

l'acide borique, le borax, le carbonate de sodium et le carbonate d'ammonium et fournissent une grande quantité d'énergie électrique aux villes voisines.

Le succès de cette entreprise a incité à utiliser les fumerolles en Italie méridionale, en Californie, en Indonésie, au Chili et en Bolivie. Mais les énormes quantités de cendres et de gaz qui se dégagent pendant les éruptions ne sont pas encore utilisées par l'homme, car l'inconstance de ces phénomènes et les risques qu'ils présentent pour les hommes et les appareils rendent la domestication des forces volcaniques très difficile.

Les dégâts que causent les volcans sont considérables, mais ne sont pas aussi grands que l'on puisse penser, si on les compare aux tremblements de terre. La population des régions avoisinant les volcans peut souffrir des phénomènes suivants liés au volcanisme: 1) tremblements de terre, précédant et accompagnant les éruptions, détruisant les édifices, les voies de communication et modifiant le régime des sources; 2) torrents de boue détériorant champs et jardins, routes et bâtiments; 3) cendres et bombes qui, étant abondantes, causent les mêmes préjudices; 4) la lave couvre les terres cultivées, les routes, les rues, détruit les maisons; 5) les nuées ardentes anéantissent sur leur passage non seulement toute végétation, mais encore tout ce qui vit, comme l'a montré l'éruption de



Fig. 183. Station volcanologique du Kamtchatka, de l'Académie des Sciences de l'U.R.S.S. Au fond, le volcan Klioutchevskaja sopka et d'autres du même groupe. De gauche à droite: le volcan Klioutchevskaja sopka, les volcans Moyen et Plat.

la montagne Pelée en 1902, qui a réduit à néant la ville de Saint-Pierre avec ses 26 000 habitants; 6) les raz de marée provoqués par les éruptions sous-marines causent de grands dégâts sur le littoral.

Tous ces phénomènes entraînent une perte plus ou moins importante de vies humaines; suivant les calculs effectués, les éruptions volcaniques ont provoqué la mort de près de 190 000 personnes depuis l'an 1500. En comparaison avec le chiffre des victimes des tremblements de terre, des inondations et des typhons (ouragans), c'est relativement peu.

VIII

COMMENT SE FORMENT ET SE DETRUISENT LES MONTAGNES

Traits essentiels du relief général de la Terre. Plissements et failles. Formes de plis et des failles. Les diaclasses. Les formes de montagnes de dislocation et montagnes volcaniques. Types de montagnes de dislocation. Destruction et disparition des montagnes. Relèvement des montagnes. Géosynclinaux et plates-formes. Oro-genèse et épirogenèse. Causes des dislocations.

Nous savons tous que la surface terrestre est constituée de hauteurs et de dépressions. Les fosses sont surtout des plaines, mais il n'est pas rare que leur surface plane soit entrecoupée par des collines, comme les dunes marines et les dunes du désert, constituées d'apports de sable, ou par des collines formées de roches affleurantes plus ou moins émoussées par l'érosion éolienne ou marine. Les hauteurs ont un relief plus varié; on distingue les montagnes isolées, les plateaux, les chaînes montagneuses isolées, les massifs montagneux et les plateaux. Nous savons déjà que les volcans peuvent être isolés, en groupes ou en petites chaînes et qu'ils sont constitués de produits d'éruption: laves et tufs.

Mais la plupart des hauteurs, quoique les roches volcaniques y participent souvent pour une part plus ou moins grande, ont une autre origine. Elles sont la conséquence de mouvements qui ont affecté la structure de l'écorce terrestre et provoqué la dislocation de ses couches, autrement dit, troublé leur mode de gisement originel. Lors de ces mouvements, les couches de roches qui se sont formées au fond des mers, des lacs, ou sur la terre ferme, sur les plans horizontaux ou légèrement inclinés, perdent leur position primitive, s'élèvent ou s'abaissent, prennent une position inclinée, se chiffonnent comme du papier ou de l'étoffe, se brisent, se recouvrent, se renversent même. Ces dislocations forment la

plupart des hauteurs de la surface terrestre et, suivant leur caractère, sont classées en deux types principaux; les dislocations plicatives ou plissements et les dislocations disjonctives ou failles.

Les formes des plis. Si nous suivons une seule et même couche de roche dans un plissement, nous verrons qu'elle monte, se courbe peu à peu en formant une voûte et s'abaisse de nouveau. Toutes les couches sous-jacentes et sus-jacentes suivent la même courbe (fig. 184). Un pli dont la convexité est dirigée vers le haut est appelé selle ou anticlinal (car dans ce repli les couches pendent en sens contraire à partir du sommet). Un pli concave est appelé synclinal ou auge (parce que les couches plongent, au contraire, de part et d'autre, du sommet vers le fond) (fig. 185 et 186).

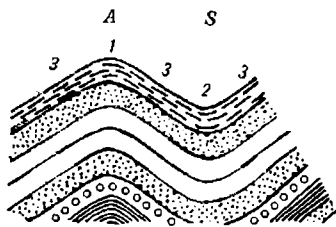


Fig. 184. Pli.

A — anticlinal, S — synclinal;
1 — voûte ou selle, 2 — auge;
3 — flancs.

L'association d'un synclinal et d'un anticlinal forme un pli entier. La partie recourbée du pli est la charnière, et les deux côtés plus ou moins plans qui se réunissent au niveau de la charnière sont les flancs. Les plis sont rarement isolés, habituellement un premier pli est suivi d'un second, puis d'un troisième et ainsi de suite, comme les rides d'une pomme cuite. La forme des plis varie également: ils sont tantôt plats, tantôt arrondis, les charnières sont parfois en courbe régulière, parfois à angles aigus.

Si les deux flancs ont le même pendage, le pli est dit droit; si les flancs n'ont pas le même pendage, le pli est dit déjeté; si la charnière se renverse sur un des flancs, le pli est dit déversé; on peut voir enfin des plis dont la charnière n'est dirigée ni vers le haut, ni vers le bas, mais de côté: les deux flancs se rapprochent de l'horizontale; un tel pli est dit couché. Ces différentes formes de plis dépendent de la force de pression: si elle est faible, les plis seront plats et droits, quand elle augmente ils deviennent de plus en plus prononcés, se déjettent, se renversent, se couchent ou même se recouvrent et forment des plis secondaires; il en résulte alors un plissement complexe que l'on peut souvent observer dans les montagnes (fig. 188 et 189). Il prouve que l'écorce terrestre a été ici fortement plissée, fortement comprimée.



Fig. 185. Plissements plats de dépôts jurassiques houilliers au pied de la chaîne Djair, Dzoungarie.



Fig. 186. Flanc d'anticlinal. Route stratégique d'Ossétie, Caucase.

Le lecteur incrédule dira sans doute: cela n'est pas possible! Des couches de roches aussi dures que les grès, les calcaires, les schistes ne sont ni du papier, ni du drap, ni du caoutchouc ou du cuir, que l'on peut plier à sa guise. Les savants, eux aussi, exprimaient autrefois ces doutes et l'on admettait que les plis s'étaient constitués alors que les roches étaient encore ductiles et se présentaient sous forme de sable, d'argile ou de vase. Mais l'étude des montagnes a montré que les roches se pliaient, en effet, à l'état dur, parce que leurs couches ont été fortement détériorées lors de ces flexions: elles sont percées par des fissures broyées par endroits, cer-

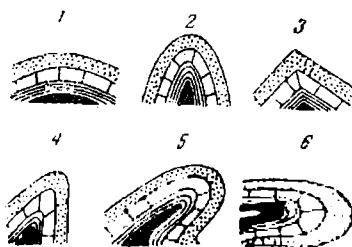


Fig. 187. Plis.

1, 2, 3 — droits, 1 — plat, 2 — raide,
3 — cassé sur la charnière, 4 — pli
déjeté, 5 — déversé, 6 — couché.

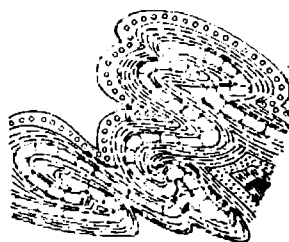


Fig. 188. Plissement complexe.

taines parties des strates se déplacent les unes par rapport aux autres. Mais ces déchirures ne suffisent cependant pas à expliquer ces plissements prononcés et complexes. Pour les comprendre, il faut que nous nous rappellions que les couches qui se trouvent actuellement en haute montagne étaient situées auparavant à de grandes profondeurs et étaient soumises à la pression des couches supérieures. Or sous un tel poids même les corps durs sont capables de changer de forme sans rupture. Différentes expériences faites par les savants l'ont prouvé. Ainsi, par exemple, le plomb sous pression s'écoule par un étroit orifice; les feuilles de fer, de cuivre et d'acier sont ployées par des machines comme des feuilles de papier. Le verre est très fragile, mais on peut le plier à froid si la force s'exerce très lentement et sans à-coups. De plus, à une grande profondeur, les roches étaient sensiblement plus échauffées et plus humides, ce qui avait aussi une influence sur leur flexibilité. Les mineurs savent par expérience que les blocs qui viennent d'être détachés de la roche mère dans la mine ou dans la carrière

sont bien plus faciles à ouvrir que ceux qui sont restés un certain temps à l'air libre. Bref, les roches pouvaient, dans les entrailles de la terre, être soumises à une flexion même assez forte en n'éprouvant que des ruptures insignifiantes, d'autant plus que les plissements ne se produisaient que très lentement.



Fig. 189. Plissement complexe dans le gneiss, Mongolie septentrionale, chaîne Khentéi.

Les formes de failles. Mais cette faculté des roches de subir une flexion n'est pas sans bornes; la pression dépassant une certaine limite, le pli se trouvait rompu en un endroit ou en un autre, sur l'axe de flexion ou sur le flanc, et ses parties se recouvraient l'une l'autre (fig. 190). On peut voir également des plis rompus dans les montagnes où le déplacement des couches peut être très important. Ce pli rompu et renversé offre déjà une forme de dislocation disjonctive: cette forme est appelée pli faillée ou pli-faille (fig. 191).

Les plis n'ont parfois qu'un flanc, en forme de coude (fig. 192, *a*), que l'on appelle flexure ou pli monoclinal (à pente unique).

Souvent les couches ne supportent pas cette tension et, se rompant, donnent naissance à une faille (fig. 192, *b*), la forme la plus répandue de dislocation disjonctive, que l'on rencontre aussi indépendamment des plissements lors des déplacements verticaux dans l'écorce terrestre (fig. 193, *a*; fig. 194 et fig. 193, *b*; *a*, faille normale, *b*, faille inverse).

La cassure qui a provoqué la formation de la faille est appelée plan de faille. S'il n'est pas vertical, mais incliné, ce qui arrive dans la plupart des cas, les couches se trouvant au toit sont appelées compartiments soulévés et celles situées au mur, compartiments effondrés.

La différence entre la faille normale et la faille inverse consiste en ce que dans le premier cas le plan effondré est au toit et dans le second cas au mur. Lors de la formation de la faille ses lèvres frottent l'une contre l'autre et se recour-

bent légèrement le long du plan de la faille; le caractère du recourbement permet de définir si la faille est normale ou inverse (fig. 193).

Lors de la rupture, le déplacement des couches le long du plan de la faille a lieu parfois non pas vers le haut ou le bas, mais de côté. On appelle cette forme de dislocation décrochement. On ne peut le représenter qu'en plan, et non en coupe comme les autres formes (fig. 195). Lorsque les couches se déplacent le long du plan de la faille, les mouvements verticaux se combinent souvent aux mouvements horizontaux, et le résultat est une faille-décrochement.

Les mineurs connaissent bien par expérience les failles et les décrochements. En rencontrant une fracture des roches, le mineur voit que la veine de houille ou le filon de minerai qu'il suivait disparaissent tout à coup, comme si on les avait coupés, et la galerie aboutit à un milieu stérile. Il faudra donc rechercher le filon ou la veine perdus en creusant plus à droite ou plus à gauche, plus haut ou plus bas. Certains indices, connus des mineurs, leur permettent de définir le genre de faille auquel on a affaire — faille

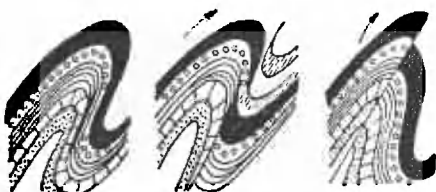


Fig. 190. Transformation d'un pli déversé en pli-faille par suite de la rupture du flanc étiré et de rupture suivant l'axe du pli.

normale ou inverse ou décrochement — afin de travailler non pas au hasard, mais dans le sens voulu.

Il nous faut encore donner quelques définitions relatives aux éléments de gisement des couches qu'il est indispensable de déterminer pour l'étude des dislocations.

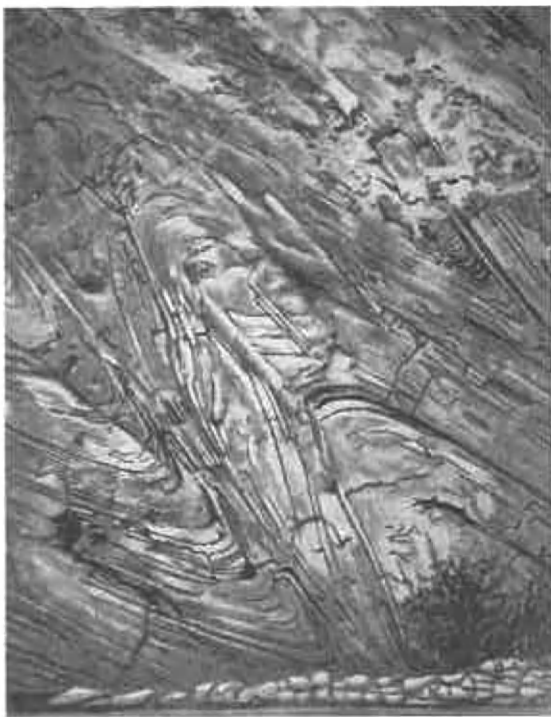


Fig. 191. Plis déversés et plis-failles dans les schistes anciens. Rivière Kadali, région de Bodaïbo, Sibérie orientale.

Si nous faisons passer une ligne droite le long de la charnière ou parallèlement à elle sur le flanc d'un pli AB , elle indiquera l'orientation du pli et s'appellera axe du pli. La perpendiculaire à cet axe dans le plan du flanc CD est appelée ligne de pendage et correspond à l'inclinaison maximum de ce plan. L'orientation de cet axe est déterminée à l'aide d'une boussole, l'angle de pendage à l'aide d'un goniomètre. Le plus facile est d'obtenir ces don-

nées avec une boussole spéciale munie d'un éclinètre. On définit l'orientation des plis par mesurage de l'orientation des couches en différents endroits des flancs le long du pli; elle peut varier avec les déviations du pli. On mesure sur les flancs leur pendage, qui peut également varier de la selle au creux, la pente s'accroissant plus ou moins suivant les plis secondaires. Dans les failles normales ou inverses, il faut mesurer l'orientation et le pendage du plan de faille, ainsi que des couches du compartiment soulevé et du compartiment effondré, ce qui permettra de déterminer le type de faille, alors que l'étude des autres indices permettra d'établir la direction

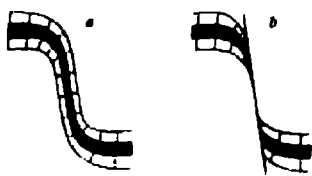


Fig. 192. Flexure (a) devenue faille (b).

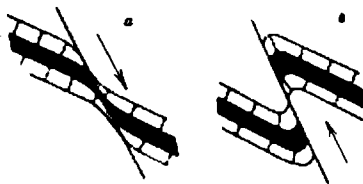


Fig. 193. Faille normale (a) et inverse (b) avec retournement des extrémités des couches.

du rejet et même, en certains cas, ses dimensions, c'est-à-dire l'amplitude de la faille.

Les grandes failles déplacent de vastes étendues de l'écorce terrestre les unes par rapport aux autres sous forme de blocs et de coins, donnant naissance à des hauteurs et à des dépressions mais d'un autre type que lors des plissements, ce que nous verrons plus loin. Ces ruptures sont très profondes, c'est pourquoi le magma emprunte le chemin le plus aisé pour monter à la surface. Les fissures provoquées par ces ruptures servent de canaux aux laccolites et aux volcans, et lorsqu'elles se remplissent de magma, elles se transforment en filons transverses de roches volcaniques. Mais toutes les fissures qui résultent des dislocations disjonctives ne se transforment naturellement pas en veines ou en filons. La plupart d'entre elles restent vides ou s'emplissent des débris de roches issus des lèvres des failles et arrachés pendant les déplacements, et formant les brèches de friction (fig. 199).

Outre ces fentes liées aux dislocations de plissement et aux failles, nous voyons dans les roches un nombre bien plus grand de fissures dont l'origine est toute différente. Les masses en fusion

qui se sont épanchées à la surface ou se sont solidifiées en profondeur étaient à l'origine homogènes et compactes. Mais comme elles se contractaient en se refroidissant, des fissures y apparaissaient qui les divisaient en gros blocs, en piliers ou encore en plaques plus ou moins épaisses. Les roches sédimentaires après s'être déposées en couches minces ou épaisses, ont été, elles aussi, soumises à cer-

Fig. 194. Faille avec retournement des extrémités des couches dans les dépôts tertiaires de la rive droite de la Koura, Borjomi, Caucase.

taines modifications. Nous savons qu'elles ont durci, mais en outre, une fois émergées, elles ont diminué de volume en séchant et ont également été coupées de crevasses. Ces fentes qui se forment dans les roches massives par suite de refroidissement et dans les roches stratifiées par suite de dessiccation, sont appelées plans de division ou diaclases, pour les différencier des fentes provoquées par la pression lors de la formation des failles. Dans les montagnes, nous voyons souvent voisiner les unes et les autres.

Dans les granits qui se sont solidifiés dans les profondeurs, nous voyons des diaclases très caractéristiques qui divisent cette

roche en blocs ayant la forme de matelas. Sur la figure 176, nous voyons un magnifique exemple de lave basaltique diaclasée en forme de pilier, caractéristique pour cette roche d'épanchement. On trouve encore des blocs diaclasés parallélépipédiques, qui se forment quand les roches sont traversées par les cassures dans les trois directions de l'espace et se débitent en parallélépipèdes de taille variable, plus ou moins réguliers. La roche peut aussi être divisée par les diaclases en plaques ou en plaquettes; et enfin les diaclases sphéroïdales divisent la roche en sphères d'un même diamètre.

Sur les hautes falaises du littoral, les berges escarpées des cours d'eau ou les versants des montagnes, on peut observer d'énormes

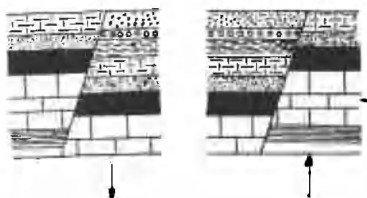


Fig. 195. Décrochements (sur plan).

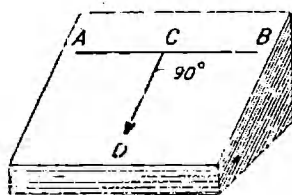


Fig. 196. Direction AB et pendage CD de la couche.

plis, où une même couche monte sur la selle à des centaines de mètres. Dans d'autres plissements on peut voir que les couches sont étrangement chiffonnées, serpentent, se recouvrent. Les observations ont montré que parfois les rejets dans les failles atteignent également des centaines de mètres. Ayant fait ainsi connaissance avec les différentes formes de dislocation et leur amplitude, autrement dit avec l'importance du déplacement, nous en viendrons inévitablement à la conclusion que ces perturbations dans la position des couches autrefois horizontales ou légèrement inclinées au fond d'une masse d'eau ont été causées par une force qui doit être énorme. Et, naturellement, nous voulons savoir l'origine de cette force, autrement dit la cause de ces dislocations, de ces perturbations grandioses de la croûte terrestre. Nous examinerons cette question plus tard, car il faut tout d'abord que nous fassions connaissance avec les formes essentielles de hauteurs résultant des dislocations à la surface de la Terre.

Les formes de montagnes sur la Terre sont très variées. En certains endroits, la force des mouvements souterrains ne faisait



Fig. 197. Fissures de failles dans le socle ancien de la Suède méridionale, qui se traduisent nettement sur le relief. Photo aérienne.

que soulever légèrement les couches provoquant des bombements larges et allongés et séparés par des dépressions. En d'autres endroits, cette force agissait plus longuement, les soulèvements étaient plus grands et leurs versants plus raides. Mais la plupart du temps les forces souterraines ne s'en tiennent pas à la formation de ces plis réguliers et calmes, dont le Jura en Suisse est un excellent exemple.

La pression était forte, les plis montaient de plus en plus haut, s'affrontaient, se renversaient et se brisaient, et les masses ignées montaient par les fissures des entrailles de la Terre, emplissant les

cavités et les vides, demeurant souvent dans les noyaux des plis et s'y solidifiant ou débouchant à la surface en formant des volcans ou des champs de laves.

C'est cette diversité d'action des forces orogéniques qui fait que nous trouvons sur notre Terre tant de formes de chaînes montagneuses, en commençant par les plus simples et en finissant par les plus complexes. La forme la plus simple est un bombement plat et large, qui est un pli isolé et se traduit à la surface de la Terre par une colline plus ou moins allongée. Si nous suivons cette colline sur toute sa longueur nous verrons qu'elle s'abaisse vers les extrémités et se confond avec la plaine environnante, alors que le centre est le plus élevé. Nous remarquerons de plus que les collines les plus longues sont rarement rectilignes, et que le plus souvent leurs extrémités se recourbent dans le même sens en formant un arc. C'est la propriété générale des plis: la partie centrale du pli où la pression était la plus forte, montait plus haut et son avance était maximum dans le sens de la poussée, alors que les extrémités où elle était plus faible retardaient dans ce mouvement. C'est pourquoi cette forme en arc des collines et des plis nous indique de quel côté s'exerçait la poussée: du côté vers lequel est dirigée la con-



Fig. 198. Plan de chevauchement dans les grès. Lausitz, Honstein, Allemagne.

cavité de l'arc (fig. 200). D'autres plis sont ondulés en plan, se courbant dans un sens ou dans l'autre.

Si la poussée ne cesse pas après la formation du premier pli, il s'en forme un second, un troisième, un quatrième. C'est pourquoi la surface terrestre présente une succession de crêtes, plus ou moins hautes et abruptes, toutes légèrement courbées en plan. Dans les pays montagneux nous voyons souvent non pas une, mais plusieurs chaînes de montagnes qui se suivent, la plus haute étant tantôt la chaîne moyenne, tantôt l'extrême. Elles sont séparées par des vallées que l'on appelle longitudinales.

Quand la poussée est extrêmement forte et que les plis se chevauchent, ces différentes chaînes peuvent se confondre par endroits et il devient alors difficile de les distinguer, surtout si des ruptures et des affleurements de

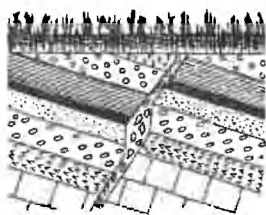


Fig. 199. Brèche dans la fissure d'une faille.



Fig. 200. Pli courbe (en plan).

roches éruptives viennent s'y joindre. Les ruptures et les épanchements se trouvent plus souvent du côté concave du pli extrême, alors que du côté convexe on voit plus fréquemment des plis couchés, déversés, se chevauchant, se recouvrant même les uns les autres, ainsi que d'énormes charriages.

Nous pouvons ainsi distinguer à présent: 1. une chaîne montagneuse simple, formée d'un seul pli; 2. les chaînes de montagnes complexes formées de plusieurs plis, plus ou moins séparées par les vallées longitudinales; 3. les régions montagneuses ou massifs montagneux où les plis sont étroitement serrés les uns contre les autres, la largeur de l'ensemble n'étant que de peu inférieure à sa longueur, alors que pour les chaînes la longueur est beaucoup plus grande que la largeur (fig. 201).

La plupart des montagnes de la Terre sont des chaînes complexes ou des massifs montagneux; citons l'Oural, le Caucase, l'Altaï, le Tian-Chan, les Alpes suisses, l'Himalaya, les Andes en Amérique du Sud, et les Cordillères en Amérique du Nord. Jetez un coup

d'œil sur la carte et vous verrez que beaucoup d'entre elles s'étendent sur des centaines de kilomètres sur les continents et toutes sont légèrement incurvées. Les Alpes sont tournées par leur concavité vers le sud, vers l'Italie, les Carpathes à l'ouest, la Hongrie, l'Altaï, le Tian-Chan, l'Himalaya vers le nord, le Caucase, l'Oural, les Andes sont doublement incurvés. Il est clair que la force qui a provoqué la formation de ces montagnes agissait en différentes directions dans divers points du globe. Nous remarquerons de plus sur la carte que de nombreuses montagnes s'unissent en formant des chaînes très longues : les Cordillères sont liées aux Andes et s'étendent à travers deux continents ; les Alpes sont liées aux Carpathes et aux Balkans d'un côté et aux Appenins de



Fig. 201. Coupe d'un massif montagneux de plissement après érosion. En pointillé, les selles aériennes, parties des selles emportées par l'érosion.

l'autre ; le Tian-Chan touche à l'Altaï au nord et au Pamir au sud, il s'unit par l'intermédiaire de ce dernier à l'Himalaya et aux montagnes de l'Iran et de la Chine. Nous verrons que les chaînes montagneuses les plus hautes et les plus longues ne sont pas des bombements fortuits de l'écorce terrestre, mais obéissent dans leur disposition à une certaine loi générale et forment de grandes bandes.

Mais nous voyons par ailleurs des montagnes isolées, des éminences, de courtes chaînes montagneuses et de petits massifs montagneux ; citons les montagnes de France, de Grande-Bretagne, d'Allemagne en Europe, celles de la Sibérie septentrionale, de l'Arabie, de l'Inde en Asie, les montagnes d'Afrique, du Brésil en Amérique du Sud, les Alleghanys ou Appalaches en Amérique du Nord, les montagnes de l'Australie.

L'étude de ces montagnes isolées montre que les unes sont les restes de longues chaînes très anciennes, disloquées et partiellement détruites ; ainsi, les montagnes d'Angleterre s'unissaient autrefois à celles de Belgique, de France et d'Allemagne, et les montagnes de la Nouvelle-Zemble sont le prolongement de l'Oural polaire.

D'autres appartiennent au type volcanique ou faillé et, en général, au type de montagnes qui ne résultent pas d'un plissement; ainsi, les montagnes de l'Inde et de la Sibérie entre la Léna et l'Iénisséi et certaines montagnes de l'Afrique sont formées par des coulées de lave épanchée des fissures et qui a couvert des espaces considérables. Elles ont dans l'ensemble une surface plane et sont appelées hauts plateaux.

Les ruptures importantes de l'écorce terrestre qui s'accompagnent de failles avec affaissement ou soulèvement de surfaces étendues entre les cassures, forment également des plateaux, hauteurs



Fig. 202. Horsts:

a — droit, b — incliné,
c — en gradins.

tabulaires de différentes hauteur et largeur. Parfois un des bords de cette table est plus élevé que l'autre, et le plateau est incliné dans un sens ou dans l'autre. Parfois des surfaces voisines séparées par des fissures s'élèvent à des hauteurs différentes, et le plateau est alors constitué par des gradins semblables aux marches d'un escalier géant. En Afrique, nous trouvons des exemples de plateaux grands et petits, dus aux failles et constitués par des couches horizontales ou légèrement inclinées.

Ces soulèvements plats localisés entre deux cassures sont appelés horsts, et les creux, les vallées entre deux ruptures, sont appelés fosses d'effondrement ou grabens. Le "horst" peut être incliné, comme il est indiqué plus haut, ou même unilatéral, si

la faille le borde d'un seul côté; il peut être échelonné, comme c'est le cas pour plusieurs fractures et des soulèvements de l'écorce terrestre à différentes hauteurs (fig. 202). Les bords des horsts ont déjà souffert de l'érosion, ils peuvent être creusés de ravins et même de gorges, et les horsts anciens présentent des massifs montagneux.

Souvent les fractures importantes de l'écorce terrestre ont lieu dans les endroits, où les dislocations plicatives avaient déjà créé auparavant des chaînes de montagnes ou des massifs montagneux détruits plus tard par l'érosion, comme nous l'apprendrons tout à l'heure. Alors les surfaces entre les fentes ne sont plus constituées par des couches non disloquées, c'est-à-dire horizontales, comme pour les exemples précédents, mais auront une structure complexe

formée de plis de divers types — droits, déjetés, déversés — et de différentes orientations.

Nous aurons comme résultat des plateaux et des massifs montagneux de caractère complexe. Ces montagnes sont très nombreuses sur la Terre: l'Oural, le Tian-Chan, les Saïans en U.R.S.S., les montagnes Rocheuses en Amérique du Nord et d'autres (fig. 203).

Mais même dans les montagnes de plissement proprement dites, les dislocations disjonctives qui se développent en même temps que les dislocations plicatives ou après, sont un phénomène très répandu. Nous connaissons déjà le pli-faille; dans certaines chaînes montagneuses, ces failles coupent non pas des plis isolés mais des systèmes de plis, les déplaçant les uns par rapport aux autres.

Un exemple de ces montagnes de type plicatif prédominant, mais aux failles développées, est le Caucase, dont une partie est montrée en coupe sur la figure 204.



Fig. 203. Coupe d'une montagne de style imbriqué, formant un horst en gradins.



Fig. 204. Coupe du versant nord de la Chaîne Principale du Caucase depuis le défilé du Darial jusqu'à la ville d'Ordjonikidzé.

Il va de soi qu'au début les couches plus récentes étaient disposées au-dessus, les couches plus anciennes au-dessous. Mais lors des plissements, leur position devient souvent inverse: dans un pli déversé ou couché les couches formant sa partie intérieure ou noyau sont évidemment plus anciennes que celles qui constituent les flancs, quoique disposées au-dessous d'elles. Si le flanc supérieur est détruit par l'érosion, nous verrons dans l'affleurement une relation anormale des couches: les couches supérieures *A* seront plus anciennes et les couches inférieures *B* plus récentes (fig. 205). Dans les plis déversés fortement, jusqu'à être couchés, une poussée orogénique ultérieure peut provoquer des perturba-

tions encore plus complexes. Ce pli poursuit son mouvement de progression; les couches dans le flanc renversé serrées par l'anticlinal qui pèse sur elles de toute sa masse contre le synclinal s'étièrent de plus en plus et finissent par se rompre, et l'anticlinal, privé de son flanc renversé, peut glisser plus librement sur le noyau du synclinal. En conséquence, le flanc supérieur de l'anticlinal devient la voûte de ce qu'on appelle charriage, où les roches les plus anciennes du noyau de l'anticlinal 1 sont couchées sur les noyaux du synclinal les plus récents 2 (fig. 206). On a trouvé de tels charriages dans les Alpes suisses, en Scandinavie, en Ecosse et ailleurs. Le déplacement de la partie supérieure d'un

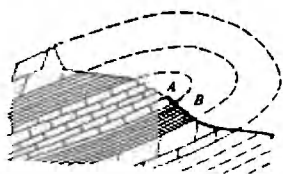


Fig. 205. Pli déversé détruit par l'érosion.

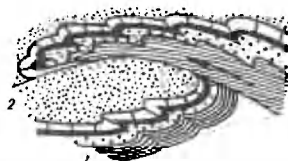


Fig. 206. Un pli couché dégénérant en nappe de charriage.

pli couché détachée en direction du mouvement peut atteindre des kilomètres et, de l'avis de certains savants, des dizaines de kilomètres même.

En résumant, suivant leur mode de formation, les montagnes de la Terre présentent deux types différents: a) montagnes de dislocation et b) montagnes d'origine volcanique. Mais il ne faut pas croire que dans les montagnes du premier type les roches éruptives font défaut. Lors de toutes les dislocations importantes, le magma s'infiltré dans les noyaux des plis en voie de constitution; aussi les roches éruptives sont-elles représentées dans les montagnes de ce type, surtout lorsqu'elles sont fortement érodées. Une fois les plis apparus il n'est pas rare de voir des éruptions volcaniques produites par les épanchements de magma venu des profondeurs. Ainsi, les roches tant effusives qu'intrusives se trouvent souvent en quantités importantes dans les montagnes de dislocation. Mais les montagnes volcaniques sont entièrement constituées par les laves et les tufs — roches d'épanchement.

On peut classer les montagnes de dislocation suivant leur mode de dislocation d'après les types ci-dessous:

1. Les montagnes de plissement formées principalement de plis, dans lesquelles les failles et les chevauchements ne jouent qu'un rôle négligeable, quoiqu'ils existent presque toujours. Le Jura suisse est un exemple de montagnes de plissement des plus simples (fig. 201).

2. Les montagnes de plis-failles, où les plis sont fortement compliqués par les failles simultanées et ultérieures. Ce type est très répandu; en Union Soviétique, on peut citer l'Oural et le Caucase (fig. 204).

3. Les montagnes en nappes de charriage superposées, formées de plis couchés qui dégénèrent en nappes de charriage (style alpin). Les Alpes suisses sont considérées comme le meilleur exemple de ce type.

4. Les montagnes de failles, qui ne se sont formées que grâce aux failles, ayant divisé l'écorce terrestre en blocs, où les couches sont horizontales ou légèrement inclinées dans un seul sens. Ce sont habituellement des plateaux surtout répandus en Afrique; en U.R.S.S. on rattache à ce type le plateau Oust-Ourt, entre la mer Caspienne et la mer d'Aral, et le plateau Oufimskoïé dans l'Oural (fig. 202).

5. Les montagnes faillées-plissées où les failles jouent le rôle principal, mais où certains blocs sont légèrement pliés ou plissés; les plis se sont rompus au moment de leur formation. On trouve de ces montagnes dans le centre et le nord-ouest de l'Allemagne centrale.

6. Les montagnes à régime imbriqué ou en écaillés qui sont caractérisées par le fait qu'après des plissements plus ou moins forts, avec chevauchement même, elles ont été soumises à une érosion intense, puis divisées en blocs par les failles, en conservant toutefois les plis initiaux. Telles sont les montagnes de l'Asie: l'Altaï, le Tian-Chan, les Saïans, la chaîne Stanovoï (fig. 203).

Tous ces types sont liés entre eux par des formes de transition.

Destruction et disparition des montagnes. Toute personne à qui les éléments de la géologie sont inconnus serait tentée de demander: les montagnes d'espèces rocheuses dures, peuvent-elles se détruire? Ne doivent-elles pas demeurer des milliers et des centaines de milliers d'années dans l'état où la nature les avait créées? Nous voyons au sommet des montagnes, sur des rochers isolés, des ruines de tours et de châteaux anciens. Ces édifices bâtis par l'homme il y a bien des siècles ont été désagrégés avec le temps,

et la roche qui les porte est toujours intacte; pourquoi ne durerait-elle pas, comme on dit, "jusqu'à la fin des siècles"?

Et pourtant les montagnes se détruisent et même jusqu'à leur base. Là où il y avait autrefois de hautes montagnes nous voyons maintenant de petites collines ou même des plaines. En Ukraine, dans le Krivoï-Rog et dans le bassin du Donetz, là où se dressaient auparavant de hautes montagnes, on ne voit maintenant qu'une plaine vallonnée et de légers coteaux. Les collines du Kazakhstan étaient dans le passé des chaînes montagneuses, alors que maintenant il n'en reste que des collines et des plaines. L'Oural était bien plus haut naguère et était formé dans toute sa largeur de chaînes rocheuses, qui s'étendaient sur plusieurs rangs de l'océan Glacial à la mer Caspienne; à présent, à l'est de la ligne de partage des eaux, il présente des vallonnements de peu de hauteur et des collines et passe insensiblement à la dépression de la Sibérie occidentale.

Le lecteur ayant pris connaissance des premières pages de ce livre ne doutera plus de la possibilité de destruction des montagnes. Il connaît déjà l'action de l'eau courante qui, aidée par les eaux souterraines, ronge sans cesse l'écorce terrestre, que les glaciers, coulant dans les vallées et usant leur lit, en emportent les débris qui tombent des versants érodés. Tous ces agents géologiques œuvrent nuit et jour pour faire disparaître toutes les irrégularités de l'écorce terrestre qu'ils s'attachent à transformer en fin de compte en plaine, légèrement surélevée au-dessus du niveau de la mer, afin que l'eau de pluie puisse stagner et non pas s'écouler, car partout où l'eau s'écoule elle travaille.

Chaque pli de roches qui s'est formé par suite d'une poussée latérale était à l'origine un bombement large et bas, ou haut et raide, plus ou moins allongé. Dans les plis les plus accentués, surtout dans les plis déjetés et déversés, des ruptures pouvaient se produire le long de la charnière, si la pression atteignait une force que les couches ne pouvaient supporter sans se rompre. Les plateaux, formés par les failles, présentaient à l'origine une masse nettement découpée large ou étroite, haute ou basse, à la surface plane et souvent avec des gradins d'un ou de deux côtés. Les plateaux formés par les épanchements volcaniques avaient le même aspect. Ainsi, toutes les montagnes, telles qu'elles étaient quand elles venaient de naître, avaient des contours très peu variés et auraient lassé le regard de l'observateur par leurs formes lourdes. Seuls les volcans produits par les amoncellements de

coulées de laves, de débris et de cendres devaient venir rompre la monotonie des régions montagneuses.

Toute la beauté, toute la diversité des paysages montagneux sont l'œuvre des forces destructrices qui fournissent le travail dont nous avons parlé. Ces agents se sont mis à l'œuvre au moment même où les forces créatrices commençaient leur labeur, car les plis et les failles se formaient d'une façon extrêmement lente. Aussitôt qu'un pli ou la lèvre d'une faille se sont élevés tant soit peu au-dessus du niveau de la pleine, la chaleur et le gel, la pluie et la neige, le vent et les plantes les ont soumis à leur action conjuguée. De jour en jour, d'année en année pendant des siècles, ces forces burinaient, foraient, limaient, rongeaient les crêtes plates des plis, les bords des failles, les vents balayaient et les pluies lavaient tout ce que leurs aides leur avaient préparé. Et peu à peu des sillons sont venus se creuser dans les flancs des plis, les rejets des failles; ces sillons s'approfondissaient, s'élargissaient et devenaient fondrières; celles-ci à leur tour se transformaient en ravins qui croissaient, se ramifiaient et devenaient vallées ou gorges. Les crêtes des plis, les bords des failles devenaient crénelés; des rochers, des tours, des murailles, des éboulis se formaient.

Le fait que les roches résistent de façon différente à l'érosion aide beaucoup l'apparition de formes diverses: les forces destructrices altèrent, de toute évidence, plus rapidement et avec beaucoup plus de succès, les espèces tendres, dont les particules sont moins fortement liées entre elles ou qui se dissolvent mieux dans l'eau. Ayant atteint une couche ou une zone de couches de cette sorte, les forces destructrices les érodent bien plus rapidement que les roches plus dures qui prennent l'aspect de murailles, de tours, de rochers qui, évidemment, se détruisent elles aussi, mais plus lentement.

Dans les hautes montagnes, dont les cimes et les crêtes dépassent les limites de la zone de végétation, le gel, la neige et la glace facilitent beaucoup le travail de l'eau. Les rochers et les crêtes tombent en morceaux, blocs ou cailloutis, la force de la pesanteur et les avalanches les précipitent vers le bas, et les glaciers les entraînent plus loin.

C'est ainsi que diverses forces travaillent à la destruction des montagnes, et après des milliers et des milliers d'années, les plis uniformes et disgracieux, les plateaux unis se transforment en un beau pays montagneux au relief accidenté et varié, avec des

chaînes de cimes dentelées, des rochers pittoresques, des falaises à pic, des versants abrupts, des éboulis, des vallées et des gorges, des cascades, des torrents impétueux, des glaciers. Cette beauté, cette diversité infinie des pays montagneux sont le fruit du labeur lent, patient et incessant de forces invisibles. Plus les plis montagneux étaient autrefois élevés, plus les plateaux étaient hauts, plus les versants étaient abrupts, plus il y avait de roches diverses qui les composaient, et plus la variété des formes et des couleurs que nous voyons maintenant est grande. Les plis larges et bas se désagrégeaient moins, les roches uniformes ont donné des formes plus monotones.

La beauté et la variété des montagnes dépendent en partie de leur situation géographique, de ce qu'elles se trouvent dans le nord ou plus au sud, car le travail des agents géologiques est fonction du climat du pays, c'est-à-dire de l'abondance des pluies et de leur répartition, de la quantité des jours chauds ou froids, des chaleurs torrides et des grands froids, de l'état du ciel, etc.

Les montagnes du nord sont moins belles; l'hiver y règne trop longtemps, et l'été est trop court et trop humide; en hiver, sous une couche épaisse de neige, les forces destructrices sommeillent, et seuls certains rochers qui émergent de la couche de neige sont soumis à l'érosion; mais un de ces principaux agents — l'eau — reste inactif durant de nombreux mois de l'année ou travaille bien plus faiblement dans le lit des cours d'eau, sous la glace. L'humidité favorise la croissance sur les versants d'épaisses forêts et de mousses moelleuses, qui ralentissent aussi le travail des forces destructrices. Les vallées sont fortement marécageuses ou couvertes de buissons, et les rivières ne reçoivent que peu de matériaux à charrier. L'érosion est ici ralentie, les rochers et les falaises sont rares, le soleil et le gel n'interviennent presque pas.

C'est seulement dans l'Extrême-Nord, au-delà du Cercle polaire, où il n'y a presque pas de végétation, que les hautes montagnes redeviennent belles, mais cette beauté est assez monotone. On y voit bien souvent émerger de sous une épaisse couche de neige et de glace des crêtes et des aiguilles pointues, des rochers abrupts où la neige n'adhère pas. Le gel et le vent durant le long hiver, le printemps, l'automne, le soleil et l'eau durant le court été travaillent, en se relayant, sur ces crêtes, ces rochers, ces aiguilles; partout ailleurs, seules la neige et la glace peuvent agir. On peut comparer ces montagnes du Grand Nord aux parties les plus élevées des hautes montagnes dans les autres zones climatiques

de la Terre où règne l'hiver éternel. Partout les mêmes forces interviennent et agissent de la même façon.

Dans le sud, où le pied des montagnes se trouve dans un climat chaud et humide alors que les cimes sont couronnées de neiges, la beauté et la diversité des montagnes se manifestent d'une façon particulièrement forte, car tous les facteurs d'érosion y travaillent avec le maximum d'efficacité.

Mais les hautes montagnes des déserts sont, elles aussi, belles à leur manière. C'est ici, du haut en bas, le règne de la pierre nue ; partout des rochers, des falaises, des crêtes dénudés, des éboulis ; les versants abrupts sont parsemés de rares touffes d'herbes chétives, les pentes plus douces sont couvertes de buissons rabougris, et au fond des vallées, le long des rares sources ont trouvé asile des bosquets, des arbustes, de maigres touffes de roseaux, offrant le repos aux voyageurs et la nourriture aux bêtes de somme. Mais les formes de ces montagnes sont très variées et le relief très accusé ; les forces destructrices y travaillent avec application, mais avec un succès inégal ; il y a peu d'humidité, peu de végétation, et c'est pourquoi l'activité des plantes et de l'eau d'infiltration est très faible. En revanche la chaleur et le gel trouvent beaucoup à faire sur le flanc des montagnes presque entièrement dénudées de haut en bas, ainsi que le vent qui souffle fréquemment dans le désert. Le vent s'éveille d'habitude avec les premiers rayons du soleil, forcé au cours de la journée et ne s'apaise qu'après le coucher du soleil. Il entraîne tout ce que lui a préparé l'action de la chaleur pendant le jour et le froid pendant la nuit. Les pluies sont rares, mais si un nuage se résout en pluie, c'est une pluie torrentielle. Elle balaie sur les rochers nus et sur les versants dénudés tout ce que le vent n'a pas eu le temps ou n'a pas pu emporter. Dans les gorges et les vallées où il n'y a pas une goutte d'eau pendant des mois se précipitent des torrents d'eau boueuse en une course effrénée ; ils renversent les pierres, déracinent les buissons et transportent le tout dans la plaine au pied des montagnes, où l'eau s'éparpille et perd sa force.

Dans le climat chaud et humide des pays tropicaux, les montagnes ont un aspect encore différent. Elles sont couvertes des pieds aux cimes de forêts épaisses où il faut se frayer un chemin à la hache. Les rochers et les falaises, bien rares, se cachent sous une végétation luxuriante ; les roches sont à l'abri de la chaleur et du froid, mais les plantes n'en travaillent qu'avec plus d'assiduité, et l'humidité abondante imbibe le sol, ce qui fait qu'à plusieurs

mètres de la surface les roches sont complètement détruites, transformées en latérite, roche argileuse, riche en hydroxydes de fer et d'aluminium.

Ainsi, le travail destructeur des forces de la nature change de caractère suivant les zones climatiques. Mais il n'y a pas d'endroit au monde où ces forces, les unes plus activement, les autres moins, ne s'emploient à la désagrégation des montagnes.

Donc, les forces de la nature transforment les plis uniformes et les surfaces planes des lèvres de failles, ainsi que les édifices volcaniques, en montagnes pittoresques et variées. Mais la création des beautés naturelles n'entre pas dans leur tâche: cette beauté se forme accessoirement et n'est que provisoire, passagère.

La tâche des forces destructrices est de faire complètement disparaître les montagnes. Démolir ces murailles dentelées, ces cimes aiguës, ces rochers abrupts, les effacer de la face de la terre, les raser jusqu'à leurs fondements — voilà le but qu'elles poursuivent. Et tant qu'on voit dans la plaine ne serait-ce qu'une seule colline, ne serait-ce même qu'une seule pierre, elles ne peuvent s'apaiser, rester inactives. Elles doivent tout détruire, pour que les rayons du soleil ne heurtent aucun rocher, pour que la pluie ne puisse rencontrer sur son passage ne fût-ce qu'un grain de sable, pour que le vent puisse s'en donner à cœur joie dans les vastes espaces sans obstacles. Et tôt ou tard, suivant la hauteur des montagnes et la dureté des roches, ces démolisseurs accompliront leur tâche et les belles montagnes disparaîtront de la face du monde.

Si nous comparons les différentes chaînes montagneuses de notre Terre, nous remarquerons qu'elles sont loin d'avoir toutes la même hauteur et les mêmes contours. Nous verrons en certains endroits des montagnes aussi hautes et belles que l'Altaï, le Caucase ou les Alpes suisses, aux défilés profonds et étroits, aux cimes aiguës et aux crêtes tranchantes, aux versants rocheux abrupts, en un mot, de ces montagnes que l'on appelle alpestres ou alpes tout court (fig. 207 et 208), à cause de leur ressemblance avec les Alpes de la Suisse qui, les premières, ont été étudiées en détail et servent de ce fait d'exemple pour la comparaison. Nous verrons en d'autres endroits des montagnes moins hautes et moins belles, aux sommets tronqués, en forme de dômes, aux crêtes larges et douces ou ondulées, aux versants moins raides où les rochers, les falaises et les gorges sont moins fréquents. Ce seront des montagnes semblables à celles de l'Oural Moyen, de maints



Fig. 207. Formes de relief alpin en climat tempéré. Le Matterhorn (mont Cervin), Alpes suisses.



Fig. 208. Relief alpin. Mont Biéloukha et lac morainique du col Bérelski, Altaï.

endroits de Sibérie (fig. 209) et de l'Allemagne méridionale. Ce sont des montagnes de hauteur moyenne.

Nous trouverons ailleurs des montagnes encore plus basses, ayant l'allure de vallonnements larges et plats sans sommets où avec des sommets peu accusés, aux versants en pente douce, séparées par de larges vallées et presque entièrement dépourvues de la beauté essentielle des montagnes : rochers, gorges, escarpements, cascades. Ce sont les montagnes du Timan, du Paï-Khoï, les Mougodjary et les Gouberlinskié dans l'Oural du Sud, les montagnes de l'Allemagne du Nord. Ailleurs encore nous pourrions voir des montagnes, ou plutôt non pas des montagnes, mais des monticules, dispersés dans la steppe un par un, en rangées ou en groupes, et séparés par des vallées ou des dépressions de plusieurs kilomètres de large, montagnes presque complètement privées de rivières et de ruisseaux vivifiants et aux contours d'une monotonie lassante, comme si on les avait faites dans le même moule. Telles sont les montagnes du Kazakhstan, auxquelles les habitants du lieu ont donné une dénomination méprisante que l'on pourrait traduire par collinaille. Par endroits seulement se dressent des cimes rocheu-



Fig. 209. Montagnes de hauteur moyenne. Vallée de l'Ténisséi, en aval du Grand rapide.



Fig. 210. Collines du Kazakhstan. Monts Karagalinskié.

ses isolées ou de petites chaînes dentelées qui reposent un peu l'œil fatigué de dizaines de kilomètres d'uniformité (fig. 210).

Il existe enfin des régions où seules des collines isolées ou des vestiges d'anciens plis dans la steppe plate et aride, ou la toundra glacée permettent de deviner qu'ici également se dressaient des montagnes, des crêtes bleuissaient dans le lointain, des torrents grondaient. C'est là la physionomie des avant-monts orientaux de l'Oural, de bien des endroits du vaste désert de Gobi en Mongolie et du nord de la presqu'île de Kola.

Ces montagnes se ressemblant si peu montrent différents stades de destruction. Elles prouvent que ces dures montagnes de pierre ne sont pas éternelles, qu'elles changent aussi et disparaissent avec le temps, comme tout ce que porte notre Terre. Mais pour les démolir il faut beaucoup de temps : des dizaines et des centaines de milliers d'années.

Les forces destructrices travaillent dans les montagnes d'une façon très discrète, mais sans se lasser, accélérant ou ralentissant leur activité suivant les saisons, le temps, la région. Ce beau rocher que nous admirons, cette cime aiguë qui se découpe sur le bleu du ciel, nous semblent immuables, éternels. Mais si nous pouvions les mesurer avec précision et les photographier et revenir au même endroit dans un siècle ou deux, une nouvelle mesure et une comparaison du nouveau cliché avec l'ancien nous montreraient que le rocher, tout comme la cime, ont changé de forme et de hauteur. Par suite du travail incessant des facteurs géologiques, les crêtes et les cimes des montagnes modifient leurs configurations, disparaissent en un endroit, apparaissent ailleurs, les versants deviennent tantôt plus doux, tantôt plus raides.

Des millions d'années passeront, et si nous pouvions renaître à la vie et jeter un coup d'œil sur des montagnes que nous connaissions bien, nous serions frappés des changements survenus. Sur l'emplacement des chaînes alpines nous trouverions des montagnes tronquées, douces: les cimes aiguës qui dépassaient les nuages et étaient ceintes de neige auraient disparu, les glaciers de même, les pointes et les crêtes anguleuses se seraient émoussées, les vallées se seraient élargies, les versants adoucis, nous ne verrions ni rochers, ni falaises, ni gorges. Au fond des vallées, au lieu des torrents tumultueux qui rugissent sur les énormes blocs de roche un paisible ruisseau babillerait entre les herbes et les buissons.



Fig. 211. Coupe d'une pénéplaine apparue sur l'emplacement de montagnes de plissement.

Et bien des siècles plus tard nous ne pourrions voir en cet endroit que des collines aux pentes douces ou même une véritable plaine.

Les figures 207-210 illustrent ces transformations.

Ainsi, les montagnes sont peu à peu détruites. Mais plus la destruction avance, plus elle va lentement. Plus les montagnes sont hautes, plus les versants sont raides, plus il y a dans les montagnes de crêtes aiguës, de rochers, de gorges, et plus intensément travaillent les forces destructrices. Quand les crêtes se seront émoussées, que les rochers auront disparu, que les versants seront en pente douce, l'érosion se ralentira de plus en plus. Une couche épaisse d'éluvions et de déluvions recouvre les roches mères et les protège contre les fortes oppositions de température, contre la pluie et le vent. Seules les eaux souterraines poursuivent leur travail dans les profondeurs. L'eau des pluies et des neiges entraîne peu à peu ces terres meubles dans la plaine, mais de nouvelles couches se forment qui prennent la place de la couche emportée. C'est pourquoi les montagnes basses et arrondies sont plus durables que les hautes montagnes. Mais elles ne peuvent pas éviter, elles non plus, leur fin inéluctable: elles se transformeront en plaines, où ne se dressera plus qu'une colline émoussée ou un petit mamelon, vestige des anciennes crêtes et cimes. Cette plaine qui prend la place des montagnes est appelée pénéplaine, et les collines, crêtes et vallonements qui y demeurent buttes-témoins (fig. 211). Les figures 212-214 représentent de tels



Fig. 212. Buttes-témoins calcaires en climat subtropical, province Kouang-si, Chine méridionale.

restes des montagnes détruites, et les figures 215 et 216, une vallée d'érosion et une vallée de failles.

Relèvement des montagnes. Ainsi donc, les montagnes disparaissent, sont détruites jusqu'à leur base. Des forces invisibles mais puissantes parce qu'infatigables ont foré, rongé ces colosses, et l'eau des ruisseaux et des fleuves, le vent les ont dispersés, grain à grain littéralement, dans toutes les directions, dans les lacs et les mers les plus proches. Dans les lits des cours d'eau, au fond des lacs et des mers, les débris des différentes roches provenant des montagnes disparues servent à former d'épaisses couches de nouvelles roches sédimentaires: grès, sables, argiles, schistes.

Des siècles passeront encore et à l'emplacement de ces mers et de ces lacs les forces orogéniques élèveront les plis de montagnes nouvelles où la part principale reviendra aux matériaux appartenant aux montagnes ayant existé dans les temps passés. Mais il n'est pas rare de voir les montagnes renaître au même emplacement.

La pénéplaine qui a pris la place d'un massif montagneux se trouve coupée par les fentes de grandes failles jusqu'à une grande profondeur. Sous la poussée des forces tectoniques, des compartiments de l'écorce terrestre se déplacent verticalement sous forme de coins, les uns plus, les autres moins, et la pénéplaine se trans-

forme en un plateau étagé (fig. 203). Les forces destructrices très affaiblies se remettent au travail dès que le relief devient irrégulier : le déchiquetage des bords des gradins, le creusage de gorges et de vallées, le démantèlement recommencent. Les crêtes, les cimes, les selles et autres accidents de terrain réapparaissent et le plateau redevient un massif montagneux à régime imbriqué.

On trouve de ces montagnes rajeunies dans différents pays. Ainsi, par exemple, l'Altaï était, il y a très longtemps, un massif montagneux de plissement que les forces destructrices avaient transformé en pénéplaine. Puis, bien plus près de notre époque, la pénéplaine a été fendue, soulevée et transformée en haut-plateau, dont les agents géologiques réveillés ont fait l'Altaï actuel avec des restes de pénéplaine qui se sont conservés à l'état de plates-formes disposées à différentes hauteurs. De plus, les couches des roches forment partout des plis enchevêtrés et accentués, dont l'orientation ne correspond pas souvent à celle des chaînes et crêtes actuelles. Cela prouve que les formes actuelles de ces montagnes ne correspondent pas à leur structure interne qui nous donne l'idée de leurs aspects anciens. Mais le nouvel Altaï subira dans un temps éloigné le même sort : il sera détruit et transformé une deuxième fois en pénéplaine.



Fig. 213. Butte-témoin en climat tempéré (calcaires tertiaires). Montagne Tépé-Kermen, Crimée.



Fig. 214. Butte-témoin d'un volcan ancien. Montagne Kalmyk-Tologoï en porphyrite et tufs porphyritiques de la chaîne Khalbine, Kazakhstan.

Les géosynclinaux et les plates-formes. Les zones particulièrement mobiles de l'écorce terrestre, où les dislocations tectoniques donnent naissance à des chaînes montagneuses, sont appelées géosynclinaux, autrement dit synclinaux (fosses) de la Terre.

Dans ces zones, l'écorce terrestre forme un creux submergé par les eaux marines dans la plupart des cas. Les produits de l'érosion sont entraînés vers le géosynclinal et se déposent sous forme de sédiments: grès, schistes, calcaires. Ces dépôts doivent naturellement remplir les géosynclinaux en peu de temps, mais par suite de leur mobilité ces derniers continuent à s'affaisser, ce processus se répète périodiquement et en fin de compte des quantités énormes de dépôts s'y amassent.

Ensuite, tôt ou tard, un mouvement inverse commence, et les forces orogéniques forment dans les géosynclinaux des chaînes de montagnes plissées s'élevant au-dessus du niveau de la mer.

On admet que les géosynclinaux peuvent ne pas être immergés, en donnant naissance à des fosses dans les limites du continent où les matériaux s'accumuleront sous forme d'alluvions continentales venues des hauteurs avoisinantes; les affaissements périodiques aidant, d'énormes épaisseurs de sédiments peuvent s'y déposer et des montagnes de plissement se formeront. On cite, en qualité de géosynclinal de ce genre, la plaine du Gange au pied de l'Hima-

laya, où des couches puissantes d'alluvions se sont déjà amassées, mises à jour par les travaux de forage, et qui prouvent le lent affaissement de cette contrée.

On oppose les plates-formes aux géosynclinaux en tant que portions de l'écorce terrestre plus stables durant la période géologique donnée.

L'orogénèse et l'épirogenèse. Les processus de dislocation qui forment les montagnes de tous types sont appelés orogéniques (donnant naissance à des montagnes). On estime qu'ils doivent être relativement de courte durée et sont comparables aux révolutions dans l'histoire de l'humanité, pendant lesquelles les forces latentes, longtemps retenues des masses populaires se mettent en mouvement et provoquent des changements brusques et profonds des régimes sociaux qui existaient jusqu'alors. De même les courtes époques orogéniques bouleversent, changent la structure de l'écorce terrestre qui pendant des périodes intermédiaires plus longues restait relativement stable.

Mais cette stabilité n'est que relative et non pas absolue. On suppose que, même pendant les époques de calme, l'écorce terrestre subit des déformations, des déplacements d'ensemble très lents par rapport aux mouvements orogéniques et ne modifiant pas sa struc-



Fig. 215. Vallée d'érosion dans les couches en pente douce.
Rivière Katcha en Crimée, près de Bakhtchisaraï.



Fig. 216. Vallée d'érosion suivant une fissure de faille entre des couches à pente raide. Rivière Darbouty dans la chaîne Djair, Dzoungarie.

ture; on les compare aux évolutions. Ces mouvements sont appelés épirogéniques (du grec "êpeiros", continent, et "génos", naissance) car ils se traduisent par la montée ou la descente de surfaces immenses, de continents entiers sous forme de bombements plats ou de larges fosses. Ils sont prouvés par la régression marine, que révèlent les anciennes terrasses, la formation des lagunes, la transformation d'îles en presqu'îles, etc., d'une part, et la transgression de la mer, l'immersion des côtes, d'autre part. On appelle aussi ces mouvements oscillations lentes de l'écorce terrestre.

Par ailleurs, ces temps derniers, certains savants en viennent à la conclusion que les processus orogéniques eux aussi sont très lents; le fait que de nombreux cours d'eau creusent leurs lits non seulement à travers des chaînes montagneuses, mais même à travers des massifs montagneux tout entiers le prouve, car un tel état des choses ne s'explique que par le fait que le cours d'eau est plus ancien que les montagnes; les plissements apparaissaient si lentement qu'il avait le temps de les creuser en conservant sa direction. On met également en doute l'existence d'époques d'accalmie entre les périodes orogéniques, et l'on suppose que l'écorce terrestre subit constamment des déformations lentes et que par conséquent il n'y a pas de différence sensible entre l'orogénèse et l'épirogenèse. Les mouvements lents, transgressifs ou régressifs de la ligne du littoral,

les abaissements d'aires continentales, ainsi que les dislocations des sédiments les plus récents ont été remarqués en différents pays, et les preuves se multiplient de soulèvements ayant eu lieu pendant la période géologique actuelle sur tous les continents, atteignant jusqu'à des centaines de mètres et se traduisant par une érosion poussée dans les massifs montagneux par suite de la pente accrue des lits des cours d'eau. Ainsi, l'époque actuelle, que l'on considérerait comme une période de calme, est, d'une façon ou d'une autre, orogénique.

Causes des dislocations. Les savants ont déjà émis de nombreuses suppositions quant aux causes qui provoquent les dislocations de l'écorce terrestre, mais elles ne sont jusqu'à présent que des hypothèses, car nous ne pouvons observer que les résultats des dislocations, alors que le processus lui-même, dissimulé à de grandes profondeurs et très lent, est inaccessible aux observations.

Une des hypothèses autrefois la plus répandue est celle de la contraction, c'est-à-dire de la compression de l'écorce terrestre, émise vers le milieu du siècle dernier. Elle admet, en accord avec Laplace, que la Terre était un corps incandescent, qui se refroidissait lentement en se couvrant d'une écorce. Mais le noyau terrestre chaud continue à perdre de la chaleur par rayonnement dans l'espace interstellaire. Les observations effectuées dans les mines et les puits de forage prouvent, qu'au fur et à mesure que nous nous enfonçons sous terre, nous rencontrons des couches de plus en plus chaudes, comme nous le savons déjà, et les éruptions volcaniques confirment que de hautes températures règnent dans les profondeurs de la Terre où se trouvent des masses en fusion. Ainsi donc, les entrailles de la Terre perdent de la chaleur et doivent par conséquent se contracter comme tout corps qui se refroidit; l'écorce terrestre devient trop large pour ce noyau contracté et doit se rider, comme une pomme ou une pomme de terre lors de leur dessiccation, c'est-à-dire lorsque la chair perd de l'eau et diminue de volume. Ce chiffonnement de l'écorce terrestre se traduit en dislocations, et les plissements des roches sont des rides. Ce processus doit se répéter périodiquement. Les pertes de chaleur sont constantes, mais pour que les dislocations aient lieu, pour surmonter la résistance des roches au plissement, il est indispensable que la tension, qui se développe peu à peu dans l'écorce terrestre, atteigne une force suffisante, autrement dit qu'elle s'accumule. C'est pourquoi les dislocations ont lieu périodiquement, durant des époques déterminées, séparées

par de longues périodes de calme et s'étendent simultanément sur le globe terrestre tout entier.

D'autres hypothèses ont été proposées et sont émises de nos jours; elles sont très variées et nous n'avons pas ici la possibilité de les exposer et de les critiquer. Il suffit de dire que la plupart d'entre elles sont basées sur des considérations relatives aux processus divers qui ont lieu dans les profondeurs de la Terre comme, par exemple, les courants qui se forment dans le magma, la différenciation, c'est-à-dire la division du magma en portions de composition différente avant la solidification, la désintégration radio-active (qui compense les pertes de chaleur et même avec excès, c'est-à-dire, qu'elle entraîne une dilatation au lieu de contraction), le flottement des continents légers sur une couche lourde sous-jacente et leur retard sur la rotation de notre planète, etc. Nous ne savons malheureusement rien de positif quant à une partie de ces phénomènes et nous ignorons même s'ils ont lieu dans les profondeurs; par conséquent, la base de ces théories est trop instable et permet les interprétations les plus contradictoires. L'hypothèse de la contraction par contre est basée sur des observations directes et des faits indiscutables. Nous voyons les éruptions des volcans qui projettent dans l'atmosphère d'énormes quantités de chaleur sous forme de gaz chauds et de vapeurs, nous voyons les coulées de lave se refroidir et de nombreuses sources thermales dégager de la chaleur. Les recherches géologiques ont montré que les éruptions volcaniques ont eu lieu dès la formation de la croûte terrestre et durant les autres époques géologiques à une échelle incomparablement plus grande qu'à présent. Les laves, les gaz et les vapeurs des volcans, l'eau et les sels des sources minérales (dont l'activité se manifestait également durant toutes les époques géologiques) sont non seulement des pertes de la chaleur issue des profondeurs, mais aussi d'énormes pertes de matière, qui se déplace des entrailles de la Terre vers les couches superficielles de l'écorce terrestre sous forme d'intrusions énormes de roches éruptives ou apparaît à la surface comme effusions.

Laissons de côté le noyau terrestre, car nous en savons trop peu sur les processus qui s'y déroulent et sur sa composition. Mais ce qui vient d'être dit sur les pertes de chaleur et de matière par les couches périphériques de ce noyau ou les couches inférieures de l'écorce terrestre prouve irréfutablement qu'elles diminuent de volume, alors que les couches extérieures, bénéficiant d'un apport de matière sous forme d'intrusions, d'effusions et de dépôts des

sources, augmentent de volume, autrement dit, deviennent trop larges pour les couches sous-jacentes et doivent, s'adaptant à ces dernières, se contracter à leur tour.

Cette contraction des couches superficielles est un fait indéniable. Les plis nombreux réduisent manifestement les surfaces qu'avaient occupées autrefois ces couches; les failles inverses et les chevauchements sont également des réductions de surface, et seules les failles normales permettraient de conclure à un certain étirement. Les géosynclinaux, zones mobiles de l'écorce terrestre, après leur transformation en chaînes montagneuses, diminuent de volume, sans aucun doute eux aussi. Les grands boucliers: Canadien, Brésilien, Baltique, d'Aldan, où l'on peut voir les plis les plus anciens de l'écorce terrestre, occupent, de toute évidence, moins de place qu'avant ces plissements.

C'est pendant ces contractions de la croûte terrestre que se développent de grands efforts, principalement tangentiels, agissant sur les couches dans le sens horizontal. C'est cette tension qui doit entraîner la formation de plis dans les couches encore plastiques des roches sédimentaires, dans les zones orogéniques, les géosynclinaux. Sur les plates-formes qui ne sont pas, comme certains pourraient le croire, des monolithes, mais, au contraire, sont constituées de parties de différentes dimensions de composition diverse et de dureté variée, et qui représentent une mosaïque grossière, cette tension se résout en soulèvement de certaines parties à une hauteur différente, parfois avec abaissement de certaines autres, en chevauchement des parties extrêmes, accompagné de décollement et de déplacement de grandes couches de roches, se recouvrant mutuellement, en plissement des couches récentes de sédiments.

Si l'on rejette la supposition que les dislocations sont rapides et ont lieu durant de courtes époques, séparées par de longs intervalles de repos, et si l'on admet la lenteur et la continuité des dislocations, une des objections les plus substantielles contre l'hypothèse de la contraction perd sa force, objection selon laquelle les couches de l'écorce terrestre ne peuvent accumuler et transmettre à des distances considérables les poussées tangentielles s'y développant. Il faut considérer que les dislocations se produisent très lentement et partout où les couches ou fractions de l'écorce terrestre sont capables de réagir à la poussée par un déplacement ou un changement de son mode de gisement. La friction de ces parties de l'écorce terrestre les unes contre les autres et la loi de l'inertie

ne leur permettent souvent pas de réagir sur-le-champ à cette tension et exigent une certaine accumulation d'énergie. Cette dernière se résout parfois, pour cette raison, en chocs, en déplacements brusques des couches : plis, failles, provoquant des heurts que les couches transmettent à de grandes distances. Ces déplacements rapides ne sont, en fin de compte, pas très grands, mais sont cause à la surface des tremblements de terre plus ou moins forts, parfois catastrophiques, avec lesquels nous ferons connaissance dans le chapitre suivant.

Des instruments de précision enregistrent à présent les tremblements de terre en de nombreuses stations séismologiques, et il s'est avéré que l'écorce terrestre tremble très faiblement mais presque constamment tantôt ci tantôt là, sans que les hommes s'en rendent compte, ce qui prouve la continuité et la lenteur des dislocations. Mais il ne s'ensuit pas que leur ampleur et leur intensité soient partout et toujours les mêmes. Elles s'accroissent, sans aucun doute, pendant les périodes des révolutions géologiques, s'affaiblissent en d'autres époques. L'accentuation dans un pays peut ne pas correspondre à un paroxysme dans un autre, mais peut le devancer ou être en retard sur lui, suivant les diverses conditions locales qui influent de façon sensible sur le caractère des dislocations.

L'hypothèse de la contraction, n'admettant qu'une seule force provoquant toutes les dislocations, est unilatérale et ne peut expliquer bien des faits. Ces temps derniers une autre hypothèse a été proposée, qu'on appelle hypothèse de pulsation et qui apporte à la théorie de la contraction des rectifications substantielles, en tenant compte non seulement des phénomènes de contraction, mais aussi des processus de dilatation.

La Terre à l'état de corps lumineux était, comme d'autres corps cosmiques, l'arène de la lutte des forces d'attraction et de refoulement. L'attraction entraînait une réduction de volume et une distribution de la matière en fonction de la densité décroissant du centre à la périphérie. Le refoulement provoquait le rayonnement et l'éjection de particules de matière dans l'espace interstellaire en forme de protubérances, semblables à celles que nous voyons autour du Soleil.

Il ne faut pas croire que l'écorce terrestre une fois formée, cette lutte de forces contraires ait pris fin ; elle doit se poursuivre en adoptant de nouvelles formes. Les forces d'attraction se traduisent en contraction de l'écorce terrestre, les forces de refoulement provoquent sa dilatation. La lutte de ces forces ne cesse pas, mais la

résistance que les couches de la croûte dure de la Terre opposent à tout déplacement, entraîne la nécessité d'une accumulation périodique d'énergie pour la vaincre. C'est pourquoi toutes les déformations se produisent par saccades, correspondant aux époques de décharge de l'énergie et séparées les unes des autres par des périodes plus calmes et plus longues d'accumulation de cette énergie.

La contraction de l'écorce terrestre s'exprime par les mouvements tangentiels suivants: dans les zones mobiles de croûte terrestre, autrement dit dans les géosynclinaux emplis de sédiments récents, ces derniers se resserrent en plis plus ou moins compliqués, le géosynclinal se rétrécit par pression latérale. Sur les plates-formes et les boucliers rigides la compression complique les plissements de leurs fondations, constituées de sédiments plus anciens et déjà plissés, ploie ces fondations sous forme de saillies et de fosses, donnant naissance à des plis larges dans les sédiments superficiels plus jeunes et encore intacts et déplace des portions importantes de l'écorce terrestre en provoquant des chevauchements et des failles. Ainsi, dans ces aires plus rigides, une diminution de surface est également observée.

Les dilatations de l'écorce terrestre se traduisent par les mouvements, principalement radiaux, suivants: dans les géosynclinaux mobiles, les plis formés par contraction se bombent et s'élèvent sous forme de chaînes et de massifs montagneux au-dessus du niveau antérieur, et de nouveaux abaissements de l'écorce terrestre, c'est-à-dire de nouveaux géosynclinaux, apparaissent à côté par étirement. Les plates-formes et les boucliers qui se bombent et se dilatent également sont coupés de fissures le long desquelles ont lieu des déplacements lents des diverses portions de l'écorce terrestre sous forme de horsts et de fossés d'effondrement ou grabens. De plus, la distension s'accompagne d'activité volcanique: le magma se précipite dans les géosynclinaux soulevés en provoquant des intrusions et des effusions de roches éruptives, alors que sur les plates-formes le magma s'écoule par les fissures en formant des revêtements de laves et en donnant naissance à des chaînes de volcans.

Cette hypothèse qui tient compte de la lutte entre les forces d'attraction et de refoulement même après la formation d'une écorce terrestre solide et admet une évolution de la Terre par bonds, l'alternance des contraires, le passage des changements quantitatifs aux changements qualitatifs, cadre mieux avec la théorie du matérialisme dialectique et, après une certaine mise au point, doit

devenir l'hypothèse la plus acceptable, celle qui explique le mieux la structure complexe de l'écorce terrestre. Elle n'est pas unilatérale comme toutes les hypothèses précitées et peut tenir compte des mouvements et transformations du magma dans les entrailles de la Terre, des phénomènes de radio-activité, de l'influence de la rotation de la Terre et autres phénomènes qui ont une influence quelconque sur la lutte des forces d'attraction et de refoulement.

La structure de l'écorce terrestre comme résultat des dislocations de différent type et des intrusions et des effusions qui y sont liées, est appelée tectonique (du grec "tektonos", structure).

Les notions de rajeunissement des montagnes ne sont apparues dans les travaux des savants qu'au début du XX^e siècle. Jusqu'à cette époque l'avis quasi-unanime était que la formation des montagnes avait pris fin pendant la période tertiaire, qui avait précédé la période actuelle, appelée quaternaire. L'époque tertiaire était considérée comme la plus jeune du point de vue formation des montagnes. C'est à cette époque que sont nés tous les systèmes montagneux de la Terre, couronnés des plus hauts sommets sur lesquels nous voyons le long de l'année des accumulations de neige et de glace donnant naissance aux glaciers descendant de ces jeunes montagnes dans les vallées qui les entourent. Telles sont les Alpes et les Carpathes en Europe, les Cordillères et les Andes dans les deux Amériques, certaines chaînes de l'Afrique, ainsi que le Tian-Chan, le Nan-Chan, l'Himalaya et autres montagnes de l'Asie.

Mais des études géologiques plus détaillées des ensembles montagneux de l'Europe et de l'Asie ont montré en différents endroits, que vers la fin du tertiaire, et même au début du quaternaire, la formation des montagnes avait encore lieu, et qu'à côté de montagnes anciennes, déjà plus ou moins émoussées et tronquées, de nouvelles surgissaient là où les couches de sédiments non seulement tertiaires mais aussi quaternaires étaient plus ou moins dérangées et produisaient des plis parfois même déversés ou retournés. Ainsi, en étudiant la chaîne Kalbinski qui est le prolongement des montagnes de l'Altaï sur la rive gauche de l'Irtych, j'ai remarqué en 1911 que son extrémité occidentale près de Sémipalatinsk était fortement abaissée et avait des formes adoucies, alors que vers l'est elle devenait de plus en plus accidentée quoique longeant, dans les deux cas, l'Irtych et devant avoir de ce fait la même configuration. Cette observation m'a amené à formuler la supposition suivante: cette chaîne s'étendant de l'ouest à l'est touche à l'Altaï, disposé sur la rive droite de l'Irtych, et, par conséquent, l'Altaï peut avoir aussi

des formes rajeunies de ce genre. N'ayant pas trouvé la confirmation de cette supposition dans les ouvrages scientifiques relatifs à l'Altaï, je décidai de visiter cette contrée. Je ne réussis à le faire qu'en 1914, et la supposition que les montagnes de l'Altaï sont rajeunies se trouva confirmée.

Des suppositions similaires quant à la jeunesse des mouvements orogéniques les plus récents ont été exprimées par certains géologues étrangers vers la fin du XIX^e siècle et devinrent peu à peu dominantes. En 1948, dans un petit compte rendu, je proposai d'adopter, pour désigner ces jeunes mouvements de la fin du tertiaire et du début du quaternaire, le terme de néotectonique qui est devenu assez courant parmi les géologues soviétiques*. On peut appeler ces montagnes surgies récemment à l'emplacement de montagnes plus vieilles et fortement érodées ou à côté d'elles, montagnes rajeunies.

* *Traits essentiels de la cinétique et de la plastique de la néotectonique.* "Bulletin de l'Académie des Sciences", série géologique, 1948, n° 5, pp. 13-24.

IX

POURQUOI LA TERRE TREMBLE-T-ELLE TANTOT ICI, TANTOT LA ?

Influence des tremblements de terre sur l'homme. Foyer et épicentre. Isoséistes et homoséistes. Les périodes de tremblements de terre. Enregistrement. Les séismomètres. Profondeur du foyer. Puissance des tremblements de terre. Zone de propagation des séismes. Causes des tremblements de terre. Les précurseurs. Conséquences des tremblements de terre. Tremblements de mer ou raz de marée. Types de tremblements de terre. Relations avec d'autres phénomènes de la nature. Mesures préventives.

On a l'habitude de considérer le sol sous les pieds, la terre, comme quelque chose de solide, d'immuable. On y élève les édifices les plus imposants, creusant leurs fondations d'autant plus profondément qu'ils sont plus lourds. C'est pourquoi quand la terre commence à manquer sous les pieds et oscille au point qu'il est impossible de se tenir sur ses jambes, quand les grands arbres se mettent à osciller, à gémir et que sous nos yeux les bâtiments les plus solides, debout depuis des dizaines d'années, s'effondrent, quand les crevasses déchirent le sol et que des profondeurs retentissent un fracas et un roulement tels que les entrailles de la Terre elles-mêmes semblent s'écrouler, l'homme est saisi de terreur, il perd la tête, ne sait où courir pour échapper au péril qui le menace.

Et cependant notre Terre, comme nous l'avons fait remarquer dans le précédent chapitre, tressaille constamment. Des instruments précis permettent d'établir qu'il y a par an de huit à dix mille tremblements de terre, c'est-à-dire à peu près un toutes les heures. En réalité, il y en a beaucoup plus, car les 2/3 de la surface terrestre sont couverts d'eau, et il ne s'y trouve pas de stations d'enregistrement, et d'ailleurs de larges étendues de continents sont également dépourvues de pareilles stations. Heureusement,

dans la plupart des cas ces séismes sont si faibles, que l'homme ne les perçoit même pas. Il ne les remarque que quand les objets qui l'entourent commencent à craquer ou à se heurter; mais ces tremblements de terre sont encore inoffensifs. Ceux qui font tinter la vaisselle, balancer les lampes suspendues et les tableaux, trembler les vitres sont un peu plus forts et peuvent nous inquiéter. Mais quand le plâtre des plafonds se détache et tombe, que différents objets se renversent, les balanciers des pendules s'arrêtent, les portes claquent et des fentes apparaissent dans les murs, les gens quittent précipitamment les édifices où ils ne se sentent plus en sécurité et qui commencent à ressembler à des pièges, et sortent dans la rue qui leur paraît plus sûre. Il y a par an quelques dizaines de ces tremblements de terre, et les cas sont très rares de séismes encore plus forts qui détruisent des villes et provoquent la perte de milliers de vies humaines. Les tremblements de terre catastrophiques qui font périr en quelques secondes plus d'hommes que les épidémies et les grandes batailles sont encore plus rares.

Les tremblements de terre se manifestent à la surface de la Terre, mais leurs foyers, autrement dit la région où ils prennent naissance, se trouvent dans les entrailles de la Terre, à une profondeur plus ou moins grande, se localisant dans un plan ou un espace dont les limites nous sont inconnues.

Pour faciliter les calculs on admet que le foyer se localise en un point que l'on appelle hypocentre. La secousse séismique en part se propageant en tous sens et imprimant à toutes les particules un mouvement oscillatoire qui s'affaiblit avec l'éloignement de l'hypocentre. A la surface, les effets maxima se font sentir dans la région située au-dessus de l'hypocentre et que l'on appelle zone épacentrale, l'épicentre étant le point disposé juste au-dessus de l'hypocentre (fig. 220).

Lorsqu'on s'éloigne de l'épicentre, les oscillations séismiques deviennent de plus en plus faibles et sont enfin imperceptibles pour l'homme, mais peuvent être fixées par des instruments précis.

L'étude des séismes ou tremblements de terre est l'objet d'une branche spéciale de la géologie appelée séismologie (du grec "seismos", secousse). Les ébranlements de l'écorce terrestre sensibles pour l'homme sont appelés macroséismes, et ceux que seuls les instruments peuvent enregistrer sont appelés microséismes.

On perçoit le plus fortement les tremblements de terre dans l'épicentre; à une certaine distance de celui-ci, nous trouverons une série de points où les séismes se manifestent avec une force égale.

En les réunissant nous obtiendrons une isoséiste, c'est-à-dire une ligne de force égale. Les isoséistes sont loin d'être régulièrement concentriques avec un centre commun à l'épicentre, mais sont des courbes plus ou moins affectées d'accidents divers, car les forces séismiques se manifestent de façon différente et dépendent pour beaucoup de la composition et de la structure de l'écorce terrestre, qui sont très inégales (fig. 217). Outre les isoséistes, nous pouvons

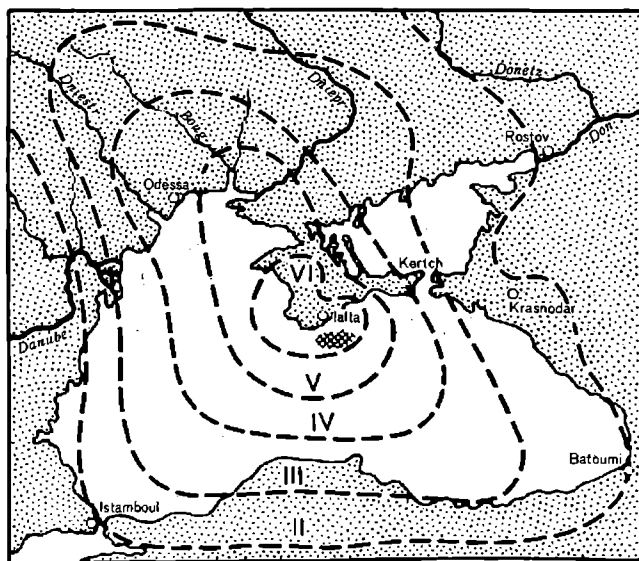


Fig. 217. Epicentres et isoséistes des tremblements de terre de 1927 en Crimée. Les points noirs dans la mer près de Ialta sont les épicentres. Les chiffres romains indiquent la puissance des séismes.

réunir par une ligne les points où le tremblement de terre se fait sentir au même instant et nous obtiendrons ainsi des courbes appelées homoséistes, qui seront irrégulières elles aussi, car la vitesse de propagation des trains d'ondes dépend de la nature des terrains traversés.

Les séismes faibles ou de force moyenne sont provoqués souvent par un seul choc qui ne dure que quelques secondes ou même quelques fractions de seconde, quoique paraissant plus prolongé à l'observateur. Les forts tremblements de terre débutent habituelle-

ment par une ou plusieurs commotions assez faibles, suivies après un intervalle de durée variable d'un ou de plusieurs chocs principaux qui sont les plus dévastateurs; puis les coups s'affaiblissent et de macroséismiques deviennent microséismiques. Le tremblement de terre peut durer quelques heures et même jusqu'à vingt-quatre heures. Parfois toute une région du globe éprouve des ébranlements de force variable pendant quelques jours, semaines ou mois. Les ébranlements de longue durée sont appelées périodes de séismes. Les chocs isolés ou les séries de chocs sont séparés par des intervalles de temps plus ou moins longs, pendant lesquels les commo-

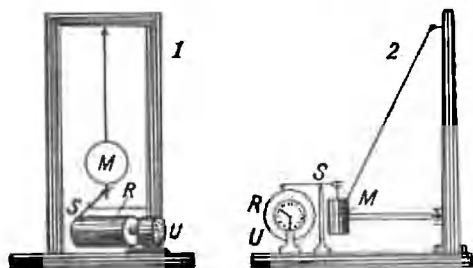


Fig. 218. Schémas de séismographes à pendules vertical (1) et horizontal (2).

M — pendule, *S* — stylet traçant, *R* — cylindre enregistreur muni de papier, *U* — chronomètre.

tions sont faibles ou très faibles. Presque tous les tremblements de terre sont accompagnés de phénomènes sonores qui font une impression terrifiante sur les hommes. Ces bruits souterrains sont quelquefois semblables aux roulements du tonnerre, au gargouillis de l'eau en ébullition, rappellent en certain cas le roulement d'un lourd train ou d'un éboulement, ou bien ils sont pareils au rugissement du vent, au sifflement d'un obus, ou encore imitent une explosion. Ces bruits devancent quelquefois le train d'ondes du séisme ou peuvent avoir du retard sur lui. Leur intensité ne permet pas de juger de la force du séisme. Il n'est pas rare qu'un fort bruit souterrain ne soit accompagné d'aucun tremblement de terre ou que celui-ci soit très faible.

Enregistrement des séismes. Pour étudier les séismes il faut disposer d'instruments permettant de fixer la durée, la force et la direction de chaque secousse séparément. Les appareils les plus simples ne permettent de fixer que le moment du premier choc, des appareils un peu plus compliqués, sa direction également. Mais ces instruments primitifs appelés séismoscopes sont remplacés depuis longtemps par les séismographes qui sont des mécanismes très complexes. La figure 218 représente schématiquement deux types de séismographes. Leur partie essentielle est un lourd pendule *M*, qui oscille dans le plan horizontal ou vertical. En

l'absence de chocs il est immobile, mais la première secousse le met en mouvement en même temps qu'un chronomètre U , qui fixe le début du séisme et fait tourner un cylindre enregistreur muni de papier R , sur lequel un stylet S trace une ligne fine qui reproduit tous les mouvements du pendule. Cette courbe est appelée *séismogramme*, et l'on peut y lire tous les chocs isolés et fixer leur durée et leur force (fig. 219), étant donné que le cylindre tourne à une vitesse déterminée et que les écarts de la courbe correspondent

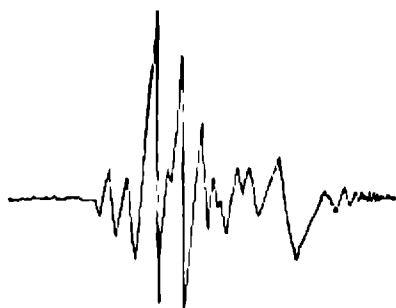


Fig. 219. Séismogramme d'un tremblement de terre.

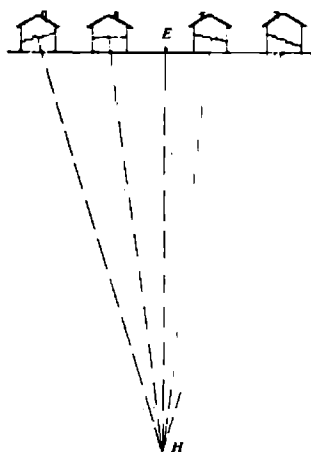


Fig. 220. Détermination de la profondeur du foyer d'un tremblement de terre.

E — épicentre, H — hypocentre (foyer).

à l'amplitude des oscillations du pendule qui est fonction de la force des secousses. Les ébranlements microséismiques se traduisent par une ligne finement dentelée.

Les bons séismographes n'enregistrent pas seulement les séismes qui ont lieu dans la région où ils sont installés et où se trouve la station séismologique ou bien dans son voisinage immédiat, mais permettent aussi de fixer les secousses les plus éloignées et de déterminer à quelle distance de la station ces séismes ont eu lieu, ainsi que leur force.

Profondeur du foyer. La question intéressante de savoir à quelle profondeur se trouve le foyer du séisme peut être résolue à l'aide

de calculs basés sur les séismogrammes. Un procédé grossier, mais qui met en évidence la méthode employée, consiste à mesurer les lézardes dans les murs des édifices (fig. 220). En déterminant l'angle que forment ces lézardes avec la surface terrestre et en traçant des perpendiculaires à ces fentes, nous trouverons le foyer à l'intersection de ces perpendiculaires et de la verticale passant par l'épicentre, ou de ces perpendiculaires entre elles.

Les observations ont montré que la plupart des séismes naissent à une profondeur allant jusqu'à 50 kilomètres de la surface terrestre, une faible partie, à une profondeur de 50 à 100 kilomètres et, dans des cas fort rares, le foyer se trouvait à des profondeurs allant de 300 à 700 kilomètres. La région qui souffre le plus du tremblement de terre se trouve autour de l'épicentre et est appelée zone pléistoséistique. Son étendue dépend non seulement de la puissance des secousses, mais aussi de la profondeur du foyer. Un fort tremblement de terre avec une zone pléistoséistique réduite possède un foyer peu profond. Une zone étendue est l'indice d'une grande force et d'une grande profondeur. Le terrible tremblement de terre de Lisbonne, en 1755, a affecté une superficie dépassant quatre fois celle de l'Europe. Le séisme de 1881 sur l'île Ischia (dans la Méditerranée) qui détruisit la ville de Casamicciola avait une étendue de 55 kilomètres carrés seulement, et son foyer était très peu profond.

L'intensité des séismes est déterminée d'après leurs conséquences; d'après l'échelle adoptée en U.R.S.S., on distingue des séismes de 12 forces différentes:

Séisme force 1 — imperceptible. Secousse microséismique que seuls les instruments enregistrent.

Séisme force 2 — très faible. Perceptible par un nombre très réduit de personnes particulièrement nerveuses, en état de repos.

Séisme force 3 — faible. Est perçu par une petite partie de la population sous forme de roulement semblable à celui que produit le passage d'une voiture.

Séisme force 4 — modéré. Peu perçu à l'air libre et dans les maisons, beaucoup; la vaisselle tinte faiblement, les vitres tremblent, les portes et les planchers grincent.

Séisme force 5 — assez fort. Est perçu par la plupart des personnes en mouvement et au travail. Les immeubles sont ébranlés comme par la chute d'un objet lourd. Les chaises, les lits vibrent.

Séisme force 6 — fort. Est perçu par tous, beaucoup de personnes se précipitent dans les rues. Les tableaux, les livres tombent, la vaisselle se brise, les enduits se fendillent.

Séisme force 7 — très fort. Les meubles dans les maisons sont renversés. Les murs se lézardent légèrement. Des morceaux de plâtre, les ornements et les moulures se détachent, des parties de cheminées tombent. Les bâtiments les moins solides sont détruits.

Séisme force 8 — destructif. Les maisons sont fortement endommagées, les murs fortement lézardés, certains murs et toutes les cheminées s'écroulent, ainsi que les tours et les cheminées d'usine.

Séisme force 9 — dévastateur. Les maisons de pierre sont fortement endommagées, certaines s'écroulent.

Séisme force 10 — anéantissement. Eboulements et glissements de terrain, fissures de l'écorce terrestre. La plupart des maisons de pierre et des constructions légères sont détruites.

Séisme force 11 — catastrophe. Grandes fissures de l'écorce terrestre, nombreux glissements de terrain et éboulements. La plupart des ponts et des maisons de bois sont détruites.

Séisme force 12 — cataclysme. Les déformations de l'écorce terrestre atteignent des dimensions énormes. Aucun édifice ne résiste.

Les causes des tremblements de terre. Il peut y avoir trois causes des tremblements de terre. Premièrement, l'effondrement de la voûte des cavités que forment dans les roches solubles de l'écorce terrestre les eaux souterraines. Ces tremblements de terre sont appelés séismes d'effondrement. Ils ont une zone de propagation très réduite, leur pléistoséiste est petite, leur foyer peu profond, mais ils peuvent causer beaucoup de dommages.

Deuxièmement, la déflagration des gaz comprimés dans le canal du volcan, lorsque ces derniers chassent le bouchon de lave de la cheminée, ainsi que les effondrements de la voûte des cavités abandonnées par la lave, ce qui fait que les éruptions volcaniques sont souvent précédées ou accompagnées de tremblements de terre plus ou moins violents. Ces séismes volcaniques sont parfois très destructeurs; leurs zones de propagation et pléistoséistiques ne sont pas grandes, la profondeur de leurs foyers, faible.

Troisièmement, tous les déplacements lents des couches dans les profondeurs de l'écorce terrestre liés aux dislocations — formation des plissements et des failles — sont fréquemment accompagnés de tremblements de terre. Ces séismes tectoniques sont les plus répandus et provoquent souvent de grands ravages; leurs zones de propagation et leurs régions pléistoséistiques peuvent avoir les dimensions les plus variées et le foyer peut se trouver à différentes profondeurs.

Les précurseurs des tremblements de terre. Les faibles frémissements de l'écorce terrestre enregistrés par les séismographes, et partiellement ceux qui sont perçus par les hommes quelques heures avant les tremblements de terre, en sont les signes précurseurs, qui ne se manifestent d'ailleurs pas toujours. Les violents tremblements de terre peuvent arriver brusquement, sans ces avertissements, ou bien ils les précèdent à un intervalle si réduit qu'ils perdent leur valeur préventive. D'autres fois tout peut se limiter à ces faibles commotions.

Les bêtes sont les plus sensibles à ces signes précurseurs. Les poules, les porcs, les ânes et d'autres animaux domestiques commencent à s'inquiéter et à s'agiter. Les fauves se cachent dans les forêts et rugissent, les crocodiles sortent de l'eau; à Cuba, les couleuvres domestiques se sauvent des maisons dans les champs.

Avant l'éruption de la montagne Pelée qui a débuté par un fort tremblement de terre au mois de mai 1902, les animaux domestiques manifestaient leur inquiétude dès la fin avril: les vaches meuglaient, les chiens hurlaient et se serraient contre les hommes; les bêtes sauvages quittaient les abords du volcan, les oiseaux s'envolaient des bois, les serpents approchaient des demeures en quantités énormes. Cela s'explique tout d'abord par l'échappement du gaz sulfureux à travers des fissures nouvelles qui se forment et, d'autre part, par le bruit souterrain qui se fait toujours entendre lorsque le volcan commence à s'éveiller; en collant l'oreille contre le sol, on peut entendre les chocs, les roulements de tonnerre causés par la pression croissante des gaz et des vapeurs. Il est compréhensible que les animaux qui ont l'ouïe plus fine et les oreilles plus près de la terre que les hommes entendent ces bruits les premiers et sentent instinctivement le danger.

Les conséquences des tremblements de terre se traduisent par la détérioration des divers édifices élevés par l'homme allant jusqu'à leur destruction complète, la formation de fissures et de failles et les décrochements des couches de l'écorce terrestre, les éboulements et avalanches dans les montagnes, les glissements de terrain, la disparition et la réapparition de sources, l'avance et le recul de la mer.

Le degré de détérioration d'un édifice dépend tout d'abord de la qualité des travaux de construction, mais aussi de la composition du sol, du caractère des secousses, de la force et de la direction du choc (fig. 221). Les secousses verticales, que l'on observe à l'épicentre et dans son voisinage immédiat, sont moins nuisibles que les trains d'ondes qui sont caractéristiques pour les régions voisines.

Les ondes provoquées endommagent fortement les bâtiments, surtout les murs qui leur sont parallèles : non seulement elles les soulèvent mais encore les ploient. L'expérience montre que les dégâts

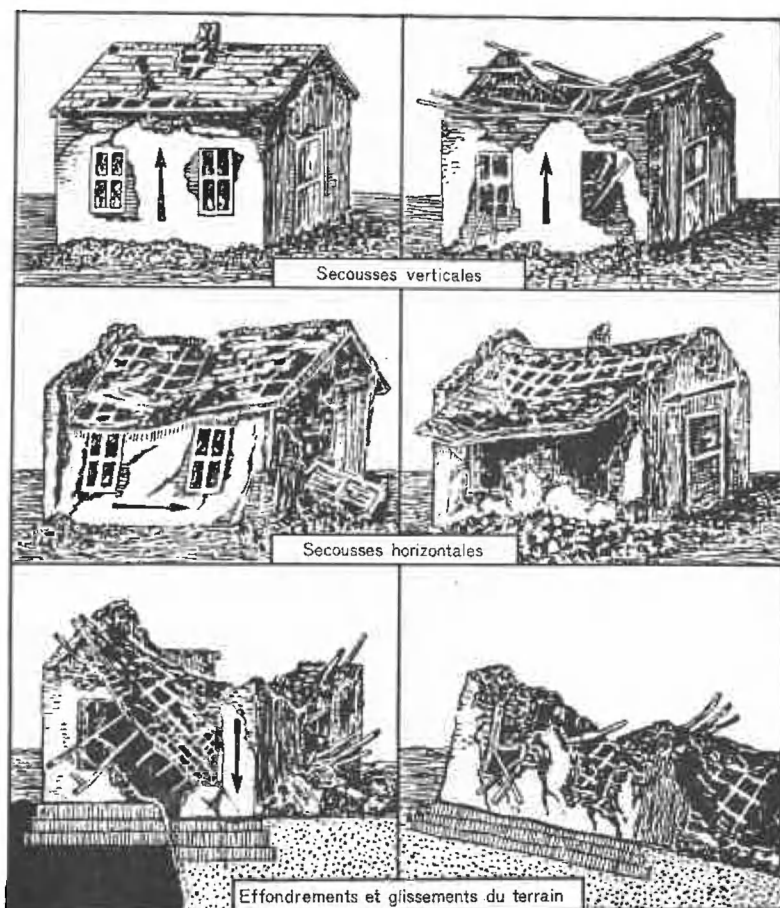


Fig. 221. Relation entre les destructions et la direction des secousses.

les plus forts sont causés par les chocs atteignant la surface sous un angle de 45 à 55°.

La composition du sol a son influence elle aussi : la vitesse de propagation des séismes en dépend et est bien plus grande dans les

roches dures que dans les roches meubles. Le train d'ondes s'affaiblit et peut même s'éteindre tout à fait dans les couches épaisses de roches meubles, comme par exemple les alluvions des vallées. Mais une mince couche de terrain meuble disposée sur une roche mère dure n'arrive pas à amortir le choc et sursaute sur sa base. Dans ces conditions, les ravages seront encore plus grands que sur les roches dures. La structure des roches influe de la façon suivante: le train d'ondes se propage plus vite dans le sens des plis et des couches qu'en travers de ceux-ci. En général les terrains les plus dangereux sont les éboulis de roches (surtout sur les escarpements), les minces couches d'alluvions au fond des vallées, puis les marais, les lacs envahis par la végétation, les tourbiers; les terrains secs sont moins dangereux que ceux saturés d'eau.

La détérioration des édifices commence par la destruction des cheminées, la chute des enduits de plâtre et des corniches, le fendillement des murs. Quand la secousse est plus forte, des pans de murs s'écroulent, le toit étant plus ou moins endommagé, lui aussi. Quand le choc est encore plus fort, l'immeuble tout entier est réduit en décombres. La qualité des matériaux de construction a



Fig. 222. Dégâts dus à la mauvaise qualité des matériaux de construction. Balaklava, Crimée, 1927.

une importance énorme elle aussi. Si les murs sont bâtis en briques liées par un mortier de bonne qualité, la construction souffrira beaucoup moins que les maisons faites de gros galets liés par un mortier de glaise. Cela s'est manifesté avec évidence pendant une série de tremblements de terre dans le Caucase et le tremblement de terre de Crimée en 1927 où beaucoup de bâtisses ont été détruites uniquement à cause de leur basse qualité (fig. 222).

La destruction des édifices est souvent accompagnée d'incendies, car les foyers détruits, les lampes renversées, les fils électriques rompus sont la source d'incendie, alors que la détérioration des conduites d'eau et l'encombrement des rues gênent le travail des pompiers. Ainsi, pendant le tremblement de terre du 1^{er} septembre 1923 au Japon, après la première secousse, 76 foyers d'incendie se sont déclarés à Tokyo, et les trois quarts de la ville furent brûlés en deux jours.

La destruction des immeubles, surtout quand les tremblements de terre surviennent la nuit, entraîne inévitablement la perte de vies humaines; beaucoup de personnes sont ensevelies sous les décombres, la panique générale et l'encombrement des rues entravent les secours et font que beaucoup de personnes vivantes ne peuvent être dégagées à temps. Ainsi, pendant le tremblement de terre de 1908 à Messine en Sicile 83 000 personnes ont été tuées; le tremblement de terre de 1920 dans la province de Kan-sou en Chine a causé la mort de 200 000 hommes; la plupart d'entre eux ont été ensevelis dans leurs demeures en cavernes creusées dans le loess. En 1934, dans les Indes, des tremblements de terre se sont produits dans 12 villes et de nombreuses bourgades; 500 000 personnes se sont trouvées sans gîte et 10 000 ont été tuées. Au Japon, de 1604 à 1914, 100 000 personnes ont péri durant les tremblements de terre et 521 000 édifices ont été détruits.

Le 1^{er} septembre 1923 le séisme de Tokyo a détruit 412 000 maisons laissant 96 000 morts.

Outre les bâtiments, les installations souterraines des villes — canalisations, égouts, conduites de gaz, câbles électriques et téléphoniques — ainsi que les ponts de pierre et métalliques

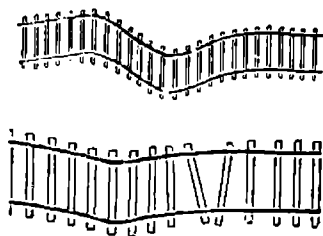


Fig. 223. Déviation des voies ferrées lors des tremblements de terre (en plan).



Fig. 224. Crevasses en Andalousie (Espagne) provoquées par le tremblement de terre du 22 décembre 1884.

(fermes déplacées de leurs points d'appui), les lignes de chemin de fer (voies tordues) (fig. 223) sont fortement endommagés.

Lors de tout tremblement de terre tant soit peu considérable, des fissures se forment dans l'écorce terrestre (fig. 224), particulièrement nombreuses dans les régions de l'épicentre. Elles divergent parfois d'un centre commun, mais sont la plupart du temps réparties sans aucun ordre, en tous sens. Dans les montagnes, elles sont habituellement orientées dans le sens du versant, sur le littoral, le long de la rive. La largeur des fissures varie de 20 ou 50 centimètres à 10 ou 15 mètres et elles s'étendent sur de nombreux kilomètres. Des maisons, des hommes et des animaux y sont précipités. Ces crevasses se forment dès le premier choc et se ferment parfois après les chocs suivants, mais souvent elles ne se referment que lentement ou restent béantes.

Si la crevasse traverse des alluvions au fond d'une vallée ou dans la plaine et qu'à une certaine profondeur se trouve une nappe aquifère, l'eau en est éjectée avec de la boue et parfois des gaz qui s'enflamment à l'air. L'eau et la boue sont parfois projetées en quantités telles que la région entière en est recouverte.

Les affaissements de surfaces plus grandes ou leur effondrement ont également lieu pendant les violents tremblements de terre (comme par exemple en Italie, en Asie mineure, dans les Indes, sur les bords du lac Issyk-Koul en Asie centrale, etc.), atteignant

jusqu'à 60 mètres en profondeur et s'accompagnant d'éjections de boue et d'eau. A Lisbonne, pendant le tremblement de terre de 1755, un quai s'est affaissé avec une foule de gens qui s'y étaient rassemblés. A Messine et à Tokyo, on a pu observer des affaissements du sol tant sur la terre ferme que sous la mer. Pendant le tremblement de terre de 1861 dans le delta de la Sélanga près du lac Baïkal une surface de 260 kilomètres carrés s'est abaissée, avec les demeures et les troupeaux qui s'y trouvaient, en moyenne de 2,9 mètres au-dessous du niveau de l'eau. Le poids de la masse affaissée était de près de 1,3 milliard de tonnes.

Les failles, les décrochements et les plissements se produisent également pendant les tremblements de terre. On a observé des plis dans les alluvions près du lac Issyk-Koul tant sur les surfaces affaissées qu'à leur proximité. Les failles et les décrochements sont très fréquents lors de la formation des fissures et s'étendent parfois sur des kilomètres entiers. Le décrochement qui a eu lieu au Japon pendant le tremblement de terre de 1891 a coupé et déplacé plusieurs chemins vicinaux et est particulièrement caractéristique sous ce rapport (fig. 226). Une faille énorme s'est étendue pendant le tremblement de terre de 1906 en Californie le long du littoral de l'océan sur des centaines de kilomètres, et des décrochements de 7 mètres avec une dénivellation de 1,3 y ont eu lieu. La ville de San Francisco a fortement souffert de ce tremblement de terre: quoique la faille principale ne soit pas passée par la ville, une



Fig. 225. Eboulis dans la vallée Ak-Djar (Zaïliiski Alataou) lors du tremblement de terre de 1887.

faille secondaire y provoqua un décrochement horizontal allant jusqu'à 3 mètres.

Le 20 décembre 1932, en Amérique du Nord, les ébranlements se sont fait sentir sur une surface de 500 000 kilomètres carrés dans le Nevada et les Etats voisins et ont entraîné un décrochement de la partie est vers le sud par rapport à la partie ouest.

Les éboulements et les glissements de terrain peuvent être provoqués par les tremblements de terre dans les pays mon-

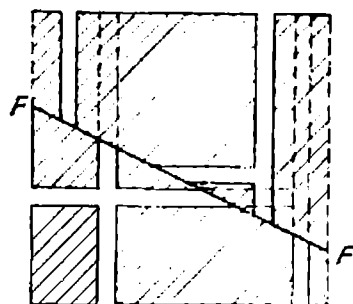


Fig. 226. Décrochement de chemins vicinaux lors du tremblement de terre de 1891 au Japon.

FF—crevasse; le pointillé indique la position des chemins avant le rejet.

tagneux. Ainsi, lors des séismes de 1887 et de 1911 qui éprouvèrent la ville de Verny (l'Alma-Ata actuel) de nombreux éboulements et glissements de terrain ont eu lieu dans les monts voisins du Tian-Chan; on estime le volume des éboulements de 1887 à 440 millions de mètres cubes; certaines des masses ayant glissé vers le bas atteignaient deux kilomètres en longueur, 200 mètres en largeur et 100 mètres d'épaisseur. Des éboulements semblables se produisirent à l'Assam, au Japon, dans les montagnes Rocheuses (U.S.A.) et dans l'Alaska.

Les perturbations dans le régime des eaux souterraines lors des tremblements de terre sont fort compréhensibles. Pendant les déplacements des couches de l'écorce terrestre, les fentes servant d'issue à l'eau peuvent être obstruées et de nouvelles ouvertes, autrement dit la disparition des sources en certains endroits et leur réapparition en d'autres peuvent en résulter. Les éboulis et les glissements de terrain peuvent également fermer d'anciennes voies de sortie de l'eau et en ouvrir de nouvelles. Les couches imperméables qui soutenaient les couches aquifères peuvent être fissurées, et l'eau y passera pour s'écouler vers les profondeurs, par suite de quoi de nombreux puits peuvent tarir.

Les tremblements de mer ou raz de marée (tsunamis). Si le foyer du séisme se trouve quelque part sous le fond de l'océan ou d'une grande mer, la secousse se propage à travers toute la couche d'eau. On la perçoit sur les navires sillonnant l'océan à ce moment. Lorsque

la secousse est verticale, c'est-à-dire au-dessus de l'épicentre, le navire s'élève soudain puis s'abaisse, on remarque un bombement de la surface de l'eau. Quand le choc est oblique, on sent un heurt, comme si le bateau avait donné contre un récif sous-marin, un iceberg ou un radeau. Les objets qui ne sont pas fixés tombent, les hommes se retiennent difficilement en équilibre, le choc ressenti au gouvernail est particulièrement fort. Il est souvent accompagné d'un bruit sourd se transmettant de l'eau à l'atmosphère.

Les conséquences du raz de marée sont plus désastreuses si l'épicentre se trouve près de la côte. Pendant la première secousse, la mer se retire sur une surface souvent très grande, puis une puissante vague de retour se précipite sur la côte et balaie tout sur son passage. Ainsi, pendant le tremblement de terre de Lisbonne en 1755, une vague haute de 26 mètres a fait périr 60 000 personnes en s'étendant à 15 kilomètres en profondeur dans le pays. Dans le Kamtchatka, en 1923, les vagues transportèrent des blocs de glace jusqu'à un demi-kilomètre de la côte, ayant enseveli plusieurs bâtiments; la toundra a été inondée sur plusieurs kilomètres. Les parties basses du littoral sont souvent couvertes des vagues tumultueuses. Les ondes soulevées par le tremblement de terre près de la côte s'étendent souvent à de grandes distances sur l'océan et endommagent les côtes, les villes et les villages du littoral.

La répartition des tremblements de terre sur la surface terrestre montre qu'ils sont étroitement liés avec les zones de dislocation et de volcanisme. La statistique nous prouve que 40 % des séismes ont lieu près des côtes de l'océan Pacifique, en passant du détroit de Magellan par les Aléoutiennes à la Nouvelle-Zélande, où, comme nous le savons, les volcans sont nombreux. Nous trouvons ici des chaînes montagneuses bordant les continents et à leur voisinage les fosses océaniques les plus profondes, longeant les côtes, c'est-à-dire les accidents de relief les plus prononcés. Près de 50 % des tremblements de terre ont lieu sur la ligne séismique qui s'étend du Mexique dans l'hémisphère occidental à travers l'Atlantique et la Méditerranée et atteint l'Inde à travers la Caspienne, elle est caractérisée par de jeunes chaînes montagneuses et des fosses profondes, ainsi que par les volcans en activité. 10 % seulement des tremblements de terre sont répartis sur les autres aires continentales, dont les plus sujettes aux séismes sont: 1) les grandes failles africaines: fosse des lacs africains, mer Morte et mer Rouge, 2) les chaînes montagneuses du Tian-Chan et du Pamir et 3) la partie sud du lac Baïkal et les régions avoisinantes.

C'est donc dans la région des jeunes plissements et des affaissements et failles récents, que se produisent la grande majorité des tremblements de terre, alors que les plates-formes anciennes y sont le moins soumises.

Les régions qui souffrent le plus des tremblements de terre en U.R.S.S. sont: 1) la Transcaucasie qui appartient à la région Méditerranéenne, ainsi que la Crimée (séisme de 1927); 2) le Tian-Chan, surtout ses contreforts septentrionaux (tremblements de terre de 1887 et de 1911 à Alma-Ata), la Ferghana et le Pamir, comme régions de montagnes jeunes de régime imbriqué et de plis-failles; 3) la région sud du lac Baïkal et les zones avoisinantes, quoique présentant une plate-forme ancienne, mais avec des effondrements récents (séismes relativement rares) et 4) le Kamtchatka et la Province Maritime depuis l'Anadyr jusqu'à Vladivostok, appartenant à la ceinture du Pacifique (les séismes y sont aussi relativement moins fréquents).

Les plates-formes Russe et Sibérienne avec leur structure peu accidentée et l'Oural avec ses monts très anciens sont au contraire très peu sujets aux séismes; ceux-ci sont quelque peu plus fréquents dans la région de l'Altaï, par suite de mouvements récents de ces montagnes de régime imbriqué.

Les types de séismes. Comme nous le savons, on distingue, suivant leur origine, les tremblements de terre d'effondrement, volcaniques et tectoniques. Les premiers sont les plus rares, les seconds plus fréquents, et les derniers les plus nombreux. On distingue encore, parmi ces catégories, les séismes centraux, dont le foyer a une aire de propagation limitée, et les séismes linéaires qui se propagent considérablement dans un seul sens. Les séismes d'effondrement et volcaniques appartiennent la plupart du temps au type central, alors que les séismes tectoniques sont le plus souvent linéaires, car leur foyer (hypocentre) est plus ou moins étendu le long des plis et des plans de failles.

Relations entre les séismes et d'autres phénomènes de la nature. Depuis longtemps déjà les hommes tentent de savoir, si les tremblements de terre n'ont pas lieu de préférence durant certaines périodes de l'année, des lunaisons, de la journée. La statistique a montré que les tremblements de terre se produisent: 1) plutôt en automne et en hiver qu'au printemps et en été (rapport 4:3); 2) plus fréquemment pendant la nouvelle lune et la pleine lune; 3) également au périgée, c'est-à-dire pendant que la Lune est le plus près de la Terre; 4) les secousses sont plus fréquentes

et plus fortes quand la Lune se trouve au méridien du lieu en question.

Il y a aussi un certain rapport entre les tremblements de terre et les vents, les précipitations atmosphériques et les changements de pression atmosphérique. Ainsi, les vents très forts provoquent des vibrations microséismiques. Les tremblements de terre sont plus fréquents après les périodes d'importantes précipitations atmosphériques. Une brusque chute ou élévation de la pression atmosphérique peut entraîner une détente dans les plissements ou les failles en engendrant un déplacement des couches, entraînant à son tour un ébranlement. Une grande quantité de précipitations atmosphériques en automne et en hiver augmentent la pression sur l'écorce terrestre, la poussée du vent et un accroissement des marées suivant la position de la Lune ont aussi leur influence.

Mesures préventives. L'homme est incapable de prévenir les tremblements de terre; on ne peut que construire des édifices à l'épreuve de secousses, même fortes, et avertir la population de leur venue afin de lui permettre de se mettre à l'abri.

A cet effet, on met sur pied dans les régions sujettes aux séismes des stations séismologiques munies d'appareils sensibles et précis, qui doivent enregistrer non seulement les chocs violents, mais aussi les microséismes et, en les étudiant, détecter les mouvements précurseurs des tremblements de terre. Ce but n'est pas encore atteint.

Les mesures préventives adoptées dans tous les pays fortement éprouvés par les tremblements de terre consistent à se conformer à certaines règles lors de l'édification des bâtiments, et notamment l'élargissement des fondations, l'emploi de tiges métalliques dans les murailles en briques, la solidité accrue des voûtes et des linteaux, la séparation des cheminées de la toiture par un jeu suffisant, l'interdiction de corniches lourdes et de moulures et l'emploi de matériaux de bonne qualité. Les édifices construits suivant les règles indiquées sont appelés antiséismiques.

X

BREF APERÇU DE L'HISTOIRE DE NOTRE TERRE

La prime jeunesse de la Terre. Formation des continents et des mers. Origine de la vie. Les fossiles et leur signification. Transformation de la face de la Terre. Les cycles de dislocation et d'érosion. Les transgressions et les régressions. La chronologie géologique. Eres archéenne, protérozoïque, paléozoïque ou primaire, mésozoïque ou secondaire, cénozoïque. Tableau synoptique. Comment on détermine l'âge de la Terre. La dérive des continents.

Personne ne peut nous décrire exactement comment s'est formée notre Terre, car évidemment aucun savant n'a pu l'observer lui-même. C'est pourquoi on en est réduit à avancer des hypothèses plus ou moins vraisemblables. Dès l'antiquité déjà, dans les pays civilisés de la Méditerranée, on a proposé des théories correspondant au niveau des connaissances de l'époque, qui sont, comme nous le comprenons maintenant, tout à fait fantastiques. La première hypothèse cosmogonique basée sur des faits scientifiques établis a été émise au XVIII^e siècle par les savants Kant et Laplace. Ils supposaient que le Soleil et toutes les planètes gravitant autour de lui avaient été engendrés par condensation d'une nébuleuse primaire, qui était incandescente, animée d'un mouvement giratoire dès avant la formation du Soleil. Cette nébuleuse dépassait par ses dimensions le système solaire tout entier et avait une forme aplatie. Sous l'influence du refroidissement et de la gravitation, la nébuleuse se condensait, et sa rotation a entraîné la formation à l'équateur d'un anneau qui, en se déchirant, s'est transformé en une sphère qui a continué à tourner sur elle-même. Le même processus s'étant répété plusieurs fois, toutes les planètes se formèrent, tournant chacune suivant son orbite autour du Soleil. La partie centrale de la nébuleuse est devenue une étoile, le Soleil

éclairant et échauffant les planètes qui gravitaient autour de lui. Un processus analogue — détachement des anneaux par suite de leur rotation rapide — a pu déterminer l'apparition des satellites des planètes.

L'hypothèse de Kant et de Laplace fut admise jusqu'au XIX^e siècle où le développement rapide de l'astronomie, de la géophysique et de la géologie a permis de mettre en évidence ses erreurs, et de nouvelles explications ont été formulées. Par exemple, le savant Chamberlin estimait qu'une petite Terre, formée comme le supposaient Kant et Laplace, augmentait progressivement de volume par suite d'une chute continue de météorites — concrétions de la matière des nébuleuses — venus de l'espace cosmique. L'astronome Jeans pensait que le système solaire s'était formé par suite du passage près du Soleil d'un autre astre, dont l'attraction provoqua une brusque rupture d'équilibre dans les couches internes du Soleil et l'émission d'un énorme jet de matière qui, après son éparpillement et sa condensation ultérieure, aurait donné toutes les planètes du système solaire. Cette hypothèse, considérée pendant un certain temps comme valable, finit par être démentie. En effet, le passage d'une étoile près de l'autre à une distance si courte qu'une telle éjection de matière puisse se faire, est un phénomène extrêmement rare et n'est pas vraisemblable pour expliquer la formation des planètes tournant autour du Soleil. On a d'ailleurs découvert dans cette hypothèse de graves erreurs, grâce surtout aux travaux des savants soviétiques.

Il y a plus de dix ans O. Schmidt de l'Académie des Sciences de l'U.R.S.S. a émis une nouvelle hypothèse de la formation de notre Terre et des planètes du système solaire. Il suppose que le Soleil, dans son mouvement à travers la Galaxie, a traversé le nuage de poussière et de gaz qu'est la matière interstellaire, en a happé une partie par son attraction et en est sorti, entouré d'une nuée formée par ces gaz et ces poussières. Ce nuage évoluait autour du Soleil suivant les lois de la gravitation universelle; les parcelles qui le formaient se déplaçaient en tous sens, entrant en collision, se fractionnant parfois, mais le plus souvent, les plus petites s'unissaient aux plus grandes et ainsi, peu à peu, des planètes ont apparu. Mais la partie du nuage la plus proche du Soleil était chauffée davantage, c'est pourquoi les planètes les plus proches du Soleil — Mercure, Vénus, la Terre et Mars, de dimensions assez réduites, sont faites de matière dense, minérale et métallique, avec des restes insignifiants de gaz, alors que les planètes plus éloignées — Jupiter,

Saturne, Uranus et Neptune, ont des dimensions énormes et sont constituées de gaz et de matières volatiles. Les corps qui n'eurent pas le temps de s'unir aux planètes solides intérieures forment les comètes et les astéroïdes.

Au début, O. Schmidt admettait le rôle important des météorites du nuage primaire dans la formation des planètes, mais plus tard, il renonça à cette supposition et considéra comme matériel de départ la masse poussiéreuse et gazeuse.

L'hypothèse de Schmidt explique bien des choses dans la formation des planètes, mais n'est pas exempte de certains défauts, comme il a été indiqué à la première conférence concernant les questions de cosmogonie*.

L'hypothèse de Schmidt considère la formation des planètes du système solaire, mais non pas celle du Soleil; elle explique bien l'apparition des planètes du type tellurien, alors que les grandes planètes avec leurs propriétés physiques particulières n'entrent pas dans son cadre. O. Schmidt n'a pas étudié l'évolution du Soleil, le problème de la formation et de l'évolution des étoiles, il n'a pas utilisé les riches données de l'astrophysique moderne. Tout cela montre que son hypothèse ne peut encore expliquer l'apparition de tous les corps célestes et demande à être mise au point.

La majorité des astronomes et des géophysiciens soviétiques considèrent que la Terre et les autres planètes du système solaire se sont formées non pas à partir de matière venue d'ailleurs, mais à partir de la matière gazeuse, du gaz et de la poussière qui se trouvaient dans les limites de ce système.

Conformément à l'hypothèse de Schmidt et de divers savants, la Terre et les autres planètes de ce type, formées à partir de la matière gazeuse, étaient froides à l'origine. Plus tard, la différenciation de la matière par gravitation a réparti la masse de la Terre selon les poids spécifiques en une série de géosphères de densités différentes, les particules plus légères se disposant plus près des zones superficielles.

La densité moyenne du globe terrestre est de 5,5, alors que la densité moyenne de l'enveloppe extérieure de la Terre, que nous pouvons étudier à la surface, dans les mines et les puits de forage, ne dépasse pas 2,5 à 3,0. La densité du noyau terrestre est très

* O. Schmidt. *Quatre leçons sur la théorie de l'origine de la Terre*, Moscou, 1950; et *Travaux de la I^{re} conférence sur les questions de cosmogonie du 16 au 19 avril 1951*, Moscou, 1951.

grande, de 8 à 11. Certains savants supposent que le noyau de la Terre est formé de fer et de nickel, d'autres expliquent l'état physique du noyau par le fait que les énormes pressions qu'il subit communiquent à sa matière un état particulier dit "métallique"; la structure de l'atome dans cette matière du noyau serait autre que celle des atomes de l'écorce, les électrons extérieurs étant déviés.

Suivant l'hypothèse de Kant et de Laplace, le globe terrestre incandescent se refroidissait à sa surface et se couvrait peu à peu d'une coque scoriacée, qui était à l'origine très mince et qui se trouvait souvent rompue sous la pression des gaz et des masses en fusion. Plus tard, cette écorce devenait de plus en plus épaisse et solide, mais une géosphère de magma igné se conservait sous elle à une profondeur de 50 à 100 kilomètres.

La découverte de tremblements de terre à foyer profond (plus de 600 kilomètres) a amené certains géologues à acquérir la conviction que l'enveloppe externe de la Terre est solide jusqu'à une très grande profondeur, 800 kilomètres au moins, ce qui cadre mieux avec la supposition que la Terre est née froide de la poussière cosmique qu'avec l'hypothèse d'une Terre ignée, liquide.

Suivant l'hypothèse de Schmidt, la Terre "froide" contenait à l'origine des matières radio-actives, qui en se désintégrant, ont servi de source d'énergie; la Terre fondait peu à peu, l'écorce terrestre demeurant seule solide. Cependant, comme l'indique A. Vinogradov, en admettant que les météorites sont des débris de planètes (ce qui est à présent considéré comme entièrement établi), nous devons admettre également que les planètes sont passées par le stade de fusion complète. Ainsi donc la Terre dont les géosphères internes, suivant les théories en cours, ont la même structure que les météorites de différents types, a dû passer elle aussi par ce stade avec ses processus de différenciation, de liquéfaction et de stratification. De l'avis de A. Vinogradov, la Terre a commencé à se refroidir de l'intérieur et a conservé longtemps une enveloppe externe liquide.

Si nous faisons un résumé de la discussion sur l'hypothèse de Schmidt à la Première Conférence de Cosmogonie, nous constaterons que dans la question de l'origine de la Terre et des planètes, ainsi que dans celle de savoir si l'énergie de désintégration des atomes des éléments radio-actifs peut à elle seule suffire à l'échauffement et à la fusion du globe terrestre, de même que dans les questions relatives à la différenciation ultérieure des matières de la

Terre et à son refroidissement, les avis des géologues, des astronomes et des géophysiciens sont partagés, car ces divers sujets ne sont pas encore suffisamment étudiés.

F. Engels dans sa *Dialectique de la Nature* indiquait que notre Terre, ainsi que tous les corps cosmiques, est le théâtre d'une lutte constante entre les forces d'attraction et de répulsion, les forces d'attraction ayant pris le dessus depuis la formation d'une croûte terrestre solide. "Sur la Terre actuelle, l'attraction, en l'emportant nettement sur la répulsion, est au contraire déjà devenue *absolument passive*; nous devons tout mouvement actif à l'apport de répulsion par le Soleil*." Cette idée a une grande importance pour l'hypothèse de la formation de la Terre. En effet, nous trouvons sur la Terre les résultats de l'action des forces d'attraction sous forme d'une contraction de l'écorce terrestre qui s'est plissée, aussi bien que ceux de l'action des forces de répulsion, qui ont succédé aux forces d'attraction. L'extension de l'écorce terrestre entraîne des ruptures, des failles avec déplacement de grands compartiments, des fissures béantes, des affaissements de portions plus ou moins importantes de l'écorce terrestre sous forme de fosses d'effondrement ou grabens. Il est indispensable d'adopter la précision de F. Engels, car sans cela il est impossible de comprendre et d'expliquer la structure de l'écorce terrestre. C'est ce qu'ont fait plusieurs géologues en créant la théorie de pulsation suivant laquelle la formation de l'écorce terrestre solide a été suivie de plusieurs périodes ou époques d'activité des forces d'attraction qui ont provoqué son rétrécissement, alternant avec des époques d'activité des forces de répulsion entraînant sa dilatation sous forme de fissures, de failles, de grabens (cf. chapitre VIII).

Ayant admis que la Terre était à l'origine un globe incandescent, ou au contraire qu'elle était un corps froid, qui fut échauffé ensuite par fusion interne et se transforma en une sphère incandescente, nous pouvons tracer le tableau suivant de son développement ultérieur.

La Terre se refroidissait peu à peu à partir de la surface se couvrant d'une croûte formée des éléments les plus légers. Cette croûte était tout d'abord extrêmement mince et se déchirait, tantôt ici, tantôt là sous la pression des gaz et des vapeurs qui se dégageaient de la masse en fusion. Mais avec le temps, elle devenait de plus en plus dure en se renforçant en dessous à la suite du refroidisse-

* F. Engels, *Dialectique de la Nature*, Editions Sociales, Paris, p. 83.

ment des couches plus profondes et en dessus par suite de la solidification des laves s'épandant par les fissures.

Les ruptures devenaient plus rares, se localisaient dans les endroits les plus minces, mais devenaient plus catastrophiques et étaient suivies d'éruptions et d'épanchements d'une force incomparablement plus grande que celle des éruptions actuelles. Sous la pression des gaz et des vapeurs la croûte se bombait et se déchirait avec fracas, projetant des blocs énormes et donnant passage à la lave. Il est possible que cette dernière s'épandait parfois plus calmement par les fissures de l'écorce.

Etant donné que ces processus avaient lieu à la surface de façon très variable, la croûte devait peu à peu devenir irrégulière, se couvrir de saillies sous forme de champs de lave de grandeur différente, divisés par des creux. C'est de cette façon que les premiers continents et les premiers océans ont été ébauchés, quoique l'eau fit encore défaut à la surface terrestre. La température de l'écorce étant à cette époque supérieure au point d'ébullition de l'eau, celle-ci se trouvait à l'état de vapeur dans l'atmosphère épaisse.

Le refroidissement se poursuivait, la vapeur de l'atmosphère se condensait et tombait sur la Terre en terribles averses qui s'évaporaient à nouveaux au contact de l'écorce surchauffée. L'air était saturé d'électricité et il est difficile d'imaginer les orages épouvantables qui grondaient au-dessus de la Terre, cependant que les éclairs déchiraient l'air épais; le calme ne s'établissait ni de jour ni de nuit, et comme des nuages épais entouraient la Terre d'un rideau opaque et continu, les rayons du Soleil ne pouvaient atteindre la surface de la Terre, qui naissait dans les tempêtes et les orages.

Mais voilà que l'écorce terrestre, arrosée et refroidie par des averses continuelles, devint froide au point que l'eau qui y tombait ne s'évaporait plus sur-le-champ et commençait à emplir les creux. L'eau bouillait dans ces mers primitives et d'épais voiles de vapeur flottaient au-dessus d'elles; l'ébullition cessa avec le temps, mais longtemps encore les mers restèrent chaudes. Il faut croire que l'eau était déjà salée, car parmi les gaz se dégageant du magma se trouvaient les composants de certains sels. L'écorce n'était pas encore très solide et se rompait par endroits, aussi la lave, s'épanchant sur les continents en épaisses coulées, atteignait-elle souvent les rivages des mers; d'immenses explosions et d'énormes nuages de vapeur résultaient du contact de la lave et de l'eau. Il n'y avait probablement pas encore de volcans semblables aux volcans actuels;

l'écorce était mince, les gaz et les vapeurs s'échappaient plus librement (fig. 227).

Cet état primitif de l'écorce terrestre a duré très longtemps, selon toute probabilité bien plus longtemps que toutes les périodes ultérieures prises ensemble. Il était encore impossible de vivre sur la Terre. Les continents étaient des champs de lave figée à la surface très irrégulière; des vapeurs et des gaz asphyxiants ou nocifs se dégageaient en sifflant en maints endroits; l'eau des mers était encore chaude, elles bouillaient comme des chaudières. L'air épais saturé de vapeurs rendait impossible la respiration; des nuages



Fig. 227. Vue de la surface de la Terre après la formation des premières mers, mais avant l'apparition de la vie.

sombres couvraient le ciel et cachaient le Soleil; les foudres fendaient l'air, éclairant de leur lueur les jours sombres et les nuits noires; des averses crevaient tantôt ici, tantôt là, et des torrents d'eau dévalaient les pentes des continents, commençant leur travail d'érosion, de transport et de dépôt du sable, de la vase, amenant ainsi la formation des premières roches sédimentaires. Il n'aurait pas fait bon vivre sur cette Terre-là, d'autant plus qu'il aurait été difficile de respirer et que la nourriture faisait totalement défaut.

Mais peu à peu les conditions s'améliorèrent: le Soleil apparaissait plus souvent, les orages devenaient plus rares, les bassins d'eau se refroidissaient et la vie y faisait enfin son apparition.

L'apparition de la vie est la deuxième énigme que la science n'a pas encore pu déchiffrer (la première est l'origine de la

Terre), et tout ce qu'on peut en dire ne représente que des hypothèses. Toutes les doctrines religieuses exploitent ce fait pour affirmer, sous une forme ou une autre, l'existence d'un créateur de la Terre et de la vie. Mais cela n'est pas une réponse, tout au plus une échappatoire, car l'existence éternelle d'un tel créateur ainsi que sa toute-puissance seraient des mystères autrement ardues que l'apparition de la vie dans l'Univers.

Le plus probable est que la vie est apparue spontanément dans le tiède océan primitif, riche en sels divers; il est possible que les décharges électriques sous forme de foudres aient ionisé l'eau et servi de poussée initiale à l'édification des premières agglomérations de protoplasme, des premières accumulations de matière albuminoïde gélatineuse qu'étaient les premiers organismes; c'est à partir d'eux que par la voie d'une évolution infiniment longue et complexe se seraient développés tous les êtres vivants: les végétaux et les animaux.



Fig. 228. Corail *Cyathophyllum heterophyllum* dévonien.

Avons-nous des données quelconques pour juger des formes anciennes de la vie sur Terre? Oui, nous en avons.

Les fossiles. Nous savons bien que l'eau des lacs et des rivières est peuplée de nombreux êtres vivants — poissons, écrivisses, grenouilles, coquillages, sangsues, etc., et que des plantes y croissent — algues, nénuphars, roseaux. Dans les mers, la faune est encore plus riche; en plus des poissons et des coquillages de différentes formes, nous y trouvons des oursins, des étoiles et des lys de mer, des coraux, des vers, des éponges et différentes algues. Les restes de ces animaux et de ces végétaux descendaient souvent au fond et sont peu à peu ensevelis dans les couches de sable, de vase ou d'argile que l'eau y dépose. Les parties molles des corps des animaux — la chair, les entrailles, etc. — se décomposent ou sont mangées par d'autres animaux avant que le cadavre ne soit complètement recouvert de dépôts; les parties dures — os, dents et écailles des poissons, carapaces des crustacés, coquilles des lamellibranches, etc. — demeurent. Ils se conservent pendant des millénaires dans les couches de sable, d'argile ou de calcaire et se pétrifient peu à peu, alors que les restes des plantes se transforment en charbon. Plus tard, quand le fleuve changera de lit, que le lac se sera desséché et que la mer aura

régressé, des restes émergés pourront se trouver dans un endroit sec et même sur les flancs dénudés des montagnes.

Ces restes pétrifiés ou carbonisés des animaux et des plantes sont appelés fossiles (fig. 228-231). On les trouve fréquemment dans les roches stratifiées, et ils ont une grande importance scientifique, car seuls ces fossiles nous renseignent sur les animaux et les plantes qui vivaient sur notre Terre aux époques les plus reculées. En comparant les fossiles des diverses couches, nous pouvons apprendre de quelle façon ont évolué la faune et la flore de notre planète. L'étude des fossiles a montré que les êtres qui peuplaient



Fig. 229. Ammonite *Miomoceras gracile* dévonienne (vue de face et de profil).

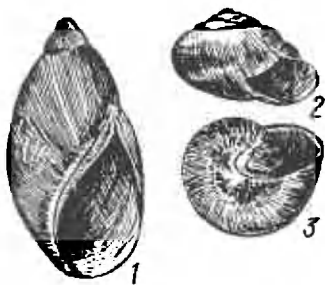


Fig. 230. Coquilles de mollusques gastéropodes *Physa gigantea* (1) et *Helix* sp. (2, 3) tertiaires.

alors la Terre étaient très différents de ceux que nous voyons actuellement, et que plus le temps qui nous en sépare est considérable, et plus cette différence est grande. C'est pourquoi les fossiles nous permettent de juger de l'âge des couches, nous donnent la possibilité de les classer suivant leur ancienneté. D'après les fossiles et les roches formant l'écorce terrestre nous pouvons reconstituer toute l'histoire de notre Terre depuis les temps immémoriaux où l'homme n'existait pas encore, et où par conséquent il ne pouvait y avoir ni histoire ni tradition, donc rien de ce qui sert habituellement aux savants pour se faire une idée de la vie aux époques anciennes et des événements qui l'ont marquée.

Outre les restes des plantes et des animaux aquatiques les fossiles sont souvent représentés par des animaux et des plantes terrestres. Le vent jette dans les eaux des fleuves et des lacs les rameaux et les feuilles des arbres et des buissons poussant au bord

de l'eau, ils se déposent au fond avec les algues. On y trouve même des troncs d'arbres tout entiers, amenés par les eaux courantes ou le ressac. Les pluies emportent vers les fleuves, les lacs et les mers des feuilles et des branches, des insectes et des mollusques terrestres, de petits oiseaux et animaux, même ceux qui vivent loin de l'eau. Les gros animaux se noient parfois en traversant les nappes d'eau, les fleuves ou pendant les inondations, s'enlisent dans les marécages, et leurs ossements sont ensevelis avec les restes des poissons et des coquillages.

Lors des éruptions volcaniques les restes des plantes et des petits animaux se trouvent pris dans les couches de tufs, se formant sur la terre ferme et sous les nappes d'eau. C'est pourquoi nous pouvons trouver dans les couches de roches schisteuses des restes fossiles de plantes et d'animaux terrestres.

De grandes quantités de débris de plantes : troncs, tiges, feuilles, mousses, accumulés au fond des lacs ou des marais, se transforment peu à peu en couches compactes de tourbe, de lignite ou de houille. Les os des animaux se concentrent parfois en ce qu'on appelle des brèches à ossements.

Transformation de la face de la Terre. Depuis que, par suite de l'irrégularité de la solidification de l'écorce terrestre, celle-ci s'est couverte de saillies sous forme de continents et de fosses qui, emplies d'eau, ont constitué les océans, les phénomènes géologiques

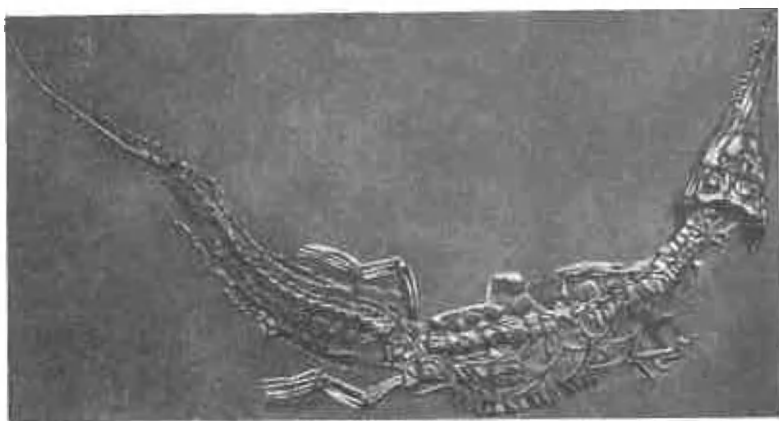


Fig. 231. Squelette d'ichtyosaure, reptile marin du jurassique inférieur, sur une plaque de schiste lithographique de Solenhofen (Bavière). Longueur du squelette : 3,9 mètres.

que nous connaissons déjà ont commencé leur travail de transformation de cette surface que le célèbre géologue Suess a appelée "face de la Terre".

Leur activité ne s'interrompt pas une minute, mais elle est soumise à des variations considérables, s'affaiblissant en certaines régions, s'accroissant en d'autres.

Tous ces facteurs n'agissent pas continuellement, et l'intensité de leur action subit des écarts allant parfois jusqu'à un calme temporaire. Ainsi, dans les pays au climat tempéré et aux hivers froids et dans les régions arctiques, l'érosion chimique et organique se ralentit et fait place à l'érosion physique qui devient plus active. Par temps calme le travail du vent se trouve ralenti; mais pendant qu'il en est ainsi dans une contrée, les ouragans peuvent sévir dans une autre. Certains volcans agissent constamment, mais faiblement, d'autres suspendent complètement pour un certain temps leur activité, puis font tout à coup preuve d'une action énergique et même catastrophique. L'écorce terrestre tremble constamment, mais les fortes secousses ne sont pas très fréquentes. Les dislocations se produisent lentement mais de façon ininterrompue, et les grandes perturbations n'ont lieu que de temps en temps, à en juger par les tremblements de terre violents. L'eau courante travaille jour et nuit, mais son activité s'accroît pendant les crues ou après les fortes averses et se ralentit en hiver. Son travail énergique dans les massifs montagneux, presque imperceptible dans les plaines, se manifeste très rarement dans les déserts, mais avec une force décuplée. Le travail du ressac est fonction de l'inconstance des vents.

Les glaciers, en général, travaillent avec le plus de régularité, mais en différents endroits de leur lit leur énergie varie; si l'on considère une période de longue durée, leur activité, elle aussi, est soumise à de fortes variations.

Cette irrégularité dans l'activité des agents géologiques, les écarts plus ou moins accentués de l'intensité de ce travail, permettent aux géologues de parler de stades, de phases et de cycles de tel ou tel processus géologique sur la Terre, les cycles étant considérés comme des laps de temps de longue durée, alors que les stades et les phases sont plus courts. Ces intervalles de temps peuvent avoir une durée très diverse non seulement pour différents processus, mais même pour un seul et même phénomène en différents endroits sur la Terre ou aux différentes époques historiques. Ainsi, par exemple, on peut considérer l'activité d'un volcan comme

cycle ou période, en le subdivisant en phases ou mieux en stades de réveil, d'éjection de produits meubles, d'effusion de laves et d'extinction. Ce cycle dure pour un volcan quelques jours, des années ou des dizaines d'années pour un autre; la durée des cycles et phases peuvent varier de façon très sensible pour le même volcan en différentes périodes historiques.

Ce sont les cycles de dislocation, d'érosion et de glaciation qui présentent le plus d'intérêt pour l'histoire de la Terre. Nous avons étudié les glaciations dans le chapitre VI. Voyons à présent les dislocations.

Les cycles tectoniques. Quoique les dislocations — mouvements de l'écorce terrestre modifiant sa structure et le mode de gisement des diverses couches — aient lieu, comme on le croit maintenant, de façon continue, il est difficile de douter des variations de l'intensité de ces mouvements. L'histoire de la Terre confirme qu'aux périodes de formation des montagnes succèdent d'autres périodes pendant lesquelles les chaînes de montagnes créées lors de l'époque précédente sont soumises à une érosion intense, qui naturellement avait lieu également pendant la période de formation, mais est devenue dominante plus tard. C'est pourquoi nous sommes en droit de parler de périodes de dislocation suivies de cycles d'érosion ou de dénudation, en entendant par ce terme l'ensemble des processus d'érosion par l'eau et d'érosion éolienne.

Pour mieux comprendre les termes définissant la durée des cycles, jetez un coup d'œil au tableau synoptique en page 295. On distingue les cycles tectoniques suivants dans l'histoire de la Terre: plusieurs cycles antécambriens ayant eu lieu pendant les ères archéenne et protérozoïque; puis le cycle calédonien, caractérisant la première moitié de l'ère primaire ou paléozoïque; le cycle hercynien ou varissien, durant la deuxième moitié de cette ère; le cycle alpin caractérisant les ères mésozoïque ou secondaire, et cénozoïque englobant le tertiaire et le quaternaire. On considère maintenant qu'il serait plus juste de subdiviser le cycle alpin en deux cycles: le cycle du Pacifique durant l'ère mésozoïque ou secondaire, et le cycle alpin proprement dit durant le cénozoïque. Chacun de ces cycles se subdivise en phases séparées par des intervalles plus ou moins longs de calme ou, au moins, d'affaiblissement des processus orogéniques.

Les cycles d'érosion. La notion de cycle introduite par le savant américain Davis facilite sensiblement la compréhension du développement des formes de la surface terrestre. Chaque cycle est divisé

en stades*. Après la formation d'un pli sous forme d'un bombement plus ou moins étendu de la surface terrestre, l'eau courante commence à creuser sur ses flancs des ornières, se transformant en ravins puis en vallées; mais le relief reste peu accidenté, les versants des vallées sont en pente douce. Les nombreux cours d'eau ne se sont pas encore réunis en systèmes complexes et aboutissent souvent à de petits lacs. Les grands fleuves suivent l'inclinaison naturelle du terrain. C'est le stade de l'enfance.

L'érosion s'accroît peu à peu, les vallées se creusent de plus en plus profondément, les versants deviennent plus abruptes, des crêtes aiguës se font jour, des cimes y apparaissent ainsi que des selles. Les cours d'eau isolés s'unissent en systèmes, une partie des lacs disparaît. Le relief est accidenté et très varié. L'érosion par l'eau courante domine partout. C'est le stade de la jeunesse.

L'évolution continue. Les vallées s'élargissent par suite de l'érosion latérale; les fleuves forment des méandres, des bancs, se divisent en plusieurs bras. Les versants, par suite de la dénudation, deviennent moins raides, les crêtes et les cimes s'émoussent, les lignes de partage des eaux s'abaissent. Les cours d'eau s'unissent en systèmes complexes. Le relief est accidenté, mais les formes sont déjà adoucies. L'érosion s'affaiblit. C'est le stade de la maturité.

L'abaissement des lignes de partage des eaux, l'adoucissement des crêtes et des cimes se poursuivent et s'accroissent, les versants deviennent en pente très douce, les fleuves dans les larges vallées deviennent très sinueux, des bras morts, des marécages se forment. Le transport de matériaux par les cours d'eau se trouve fortement ralenti. Le processus de dépôt domine. Le relief devient plat. C'est le stade de la vieillesse.

Enfin l'abaissement de la ligne de partage des eaux, l'adoucissement des pentes, la disparition de tous les accidents de relief atteignent leur maximum. Le travail de l'eau se ralentit tout à fait, les cours d'eau coulent à peine et deviennent extrêmement sinueux, de nombreuses vallées s'assèchent. La contrée est tellement arasée qu'elle se rapproche d'une plaine et on l'appelle pénélaine. C'est le stade de la décrépitude.

* Une phase est un ensemble de phénomènes qui aboutissent à un résultat donné, puis cessent, c'est-à-dire que les phases sont séparées par des intervalles, alors que les stades forment une suite ininterrompue d'événements.

Il est à noter que plus le cycle d'érosion progresse, et plus les divers stades sont prolongés. Aux stades de la jeunesse et de la maturité cette durée est fonction des accidents que doit produire l'érosion, alors que pendant les stades de la vieillesse et de la décrépitude la durée de ceux-ci dépend de l'affaiblissement de l'activité des agents d'érosion, suite de l'inclinaison presque nulle des lits des cours d'eau et la faiblesse des pentes. En qualité d'exemples de régions se trouvant à différents stades du cycle d'érosion citons les suivantes: le Kazakhstan du Nord et la Finlande (décrépitude et vieillesse), le versant est des monts de l'Oural (vieillesse), la ligne de partage des eaux et le versant occidental de l'Oural, ainsi que de nombreuses montagnes de Sibérie (maturité). Le Caucase est un bon exemple du stade de la jeunesse.

Rajeunissement du cycle d'érosion. Le cycle d'érosion ne peut passer calmement d'un stade à l'autre qu'à la condition d'une stabilité complète de l'écorce terrestre de la région donnée, car les mouvements lents qui accentuent les plissements, et d'autant plus les mouvements brusques qui provoquent des modifications du relief tels que failles et flexures, doivent inévitablement entraver sa marche. L'histoire de la Terre présente plus d'un exemple de telles perturbations. Imaginons une pénéplaine ou une région au stade de la vieillesse se soulevant rapidement et donnant ainsi naissance à un haut plateau entre deux failles, c'est-à-dire produisant un horst simple. Aux limites de ce dernier, où la pente se trouve brusquement modifiée, l'eau courante se mettra immédiatement au travail en creusant des rigoles. Ces rigoles se transformeront plus tard en ravins et en gorges, dont les sources empiètront de plus en plus sur le horst. Ce dernier repassera par les stades de la jeunesse, de la maturité et après un long laps de temps peut revenir au stade de la vieillesse; ici, le cycle d'érosion a repris, il s'est rajeuni.

Ce rajeunissement prendra des formes encore plus complexes, si la pénéplaine est coupée par les failles en plusieurs bandes ou coins, qui seront soulevés à des hauteurs différentes; les agents d'érosion reprendront leur travail à la limite de chaque bande et transformeront les gradins du horst en massifs montagneux.

On peut citer des exemples de tels rajeunissements en différents pays. Citons l'Altaï qui était autrefois une contrée de montagnes de plissement, puis a été érodé jusqu'à l'état de pénéplaine, coupé en coins par les failles; ces portions de terrain, élevées à des hauteurs différentes, ont été transformées par l'érosion en chaînes montagneu-

ses d'aspects divers. Mais on peut voir à leur surface, en maints endroits, des zones planes, vestiges de l'ancienne pénéplaine. Ces vestiges, de même que la structure complexe des chaînes actuelles et la discordance de leurs couches avec l'orientation des anciens plis montrent que l'Altaï est, comme nous l'avons déjà dit, une chaîne de plis-failles et que son relèvement en tant que massif montagneux est la suite du rajeunissement du cycle d'érosion.

On voit les indices de rajeunissement également dans d'autres montagnes de la Sibérie, où les pentes raides, les défilés dans les cours moyen et inférieur de nombreux fleuves et rivières, ainsi que les rapides et même les chutes d'eau sont un témoignage d'une érosion énergique, du stade de la jeunesse. En même temps, le cours supérieur de ces mêmes fleuves, avec ses vallées marécageuses, ses versants à pente douce, ses crêtes arrondies, les cours d'eau lents et faibles attestent la vieillesse. L'ensemble de ces indices prouve qu'un soulèvement de la contrée a eu lieu récemment, qui a provoqué une érosion intense dans les cours moyen et inférieur; mais ce rajeunissement n'a pas encore pu s'étendre à leurs sources qui se trouvent toujours à l'état de vieillesse. On peut même déterminer l'époque du dernier soulèvement: les défilés des rivières sont creusés dans le fond des vallées glaciaires formées durant la dernière glaciation. Par conséquent, le soulèvement est plus récent.

La première glaciation a eu lieu dans un pays au relief doux, donc le soulèvement se rapporte au commencement de la dernière époque glaciaire, car l'érosion n'a pas encore eu le temps de découper profondément la pénéplaine soulevée.

Les transgressions et les régressions. Nous en sommes amenés à supposer dans l'histoire de la Terre des envahissements répétés des mers sur des étendues plus ou moins grandes, ainsi qu'une suite de reculs entraînant une augmentation de la surface de la terre ferme. On appelle les premiers transgressions et les seconds régressions. En certains cas les deux phénomènes avaient lieu simultanément, c'est-à-dire que les transgressions se manifestant en certaines parties du globe terrestre correspondaient à des régressions en d'autres endroits, alors que durant d'autres époques on pouvait remarquer une prédominance soit des transgressions, autrement dit, des réductions de la surface, soit des régressions, ces dernières habituellement liées au processus de formation des chaînes montagneuses.

Pendant les transgressions, la mer peut avancer sur un massif montagneux en détruisant progressivement ses plissements et en formant à leur place des terrasses marines qui reculent vers l'intérieur du continent. On appelle ce processus abrasion marine. Les sédiments marins se déposent alors en discordance marquée avec les couches plus anciennes, autrefois soumises à la dislocation (fig. 232). Si la mer envahit une pénéplaine, résultant des processus d'érosion et de dénudation, les couches de sédiments seront également en discordance avec les couches plus anciennes à inclinaison variée, mais l'on pourra observer entre

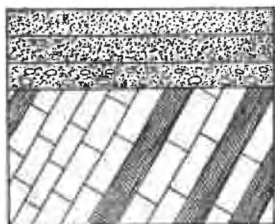


Fig. 232. Transgression avec abrasion et discordance angulaire très marquée.



Fig. 233. Transgression sur une surface de dénudation avec des vestiges de l'écorce d'érosion (*E*).

les deux séries de couches des vestiges de l'écorce d'érosion (fig. 233). La mer peut également avancer sur une plaine formée des roches plus anciennes n'ayant pas été soumises à la dislocation, et dans ce cas ses sédiments se déposeront en couches apparemment concordantes avec les couches plus anciennes, quoique séparées de celles-ci par un intervalle de temps plus ou moins long. C'est ce qu'on appelle discordance cachée. Une étude attentive permet de déceler à la surface des couches anciennes des traces d'érosion marine ou éolienne, et des débris de roches anciennes dans la couche inférieure des jeunes sédiments (fig. 234).

La chronologie géologique. La chronologie géologique, autrement dit, le tableau synoptique des événements qui jalonnent l'histoire de la Terre, est basée sur l'étude des cycles d'érosion, de dislocation, de volcanisme, de transgression et régression et surtout sur l'étude des fossiles. Mais les couches les plus anciennes de la Terre n'en contiennent pas, car les premiers êtres apparus

à sa surface ne possédaient ni squelette, ni carapace solide capables de se conserver dans les sédiments. Sous l'influence de la chaleur des gaz et des vapeurs d'intrusions abondantes ou sous l'action de la chaleur et de la pression qu'ils subissaient à de grandes profondeurs, ces sédiments ont une structure et une texture complètement modifiées, ils ont changé d'aspect et sont devenus ce qu'on appelle des roches métamorphiques.

Les époques les plus anciennes duraient très longtemps. Ce n'est que vers leur fin, quand la vie a commencé à se développer et que des formes diverses sont nées, que les premiers fossiles font



Fig. 234. Discordance cachée ou lacune stratigraphique.

C — cambrien, D — dévonien.

leur apparition dans les couches de sédiments. Ce sont, pour la plupart, des algues d'espèces différentes, qui forment des couches entières, des empreintes de corps de méduses, d'éponges, ainsi que des êtres que l'on détermine comme étant les premiers crustacés, des coraux primitifs, des traces de vers. La vie se concentrait encore dans l'eau, la terre ferme n'était qu'un désert absolu.

Cette époque, la plus ancienne dans l'histoire de la Terre, où commence la formation des premières roches sédimentaires, est appelée ère archéenne. On appelle ère un espace de temps extrêmement long, en l'occurrence des

centaines de millions d'années. Il n'y a pas encore de fossiles dans les sédiments de l'ère archéenne, mais la présence du carbone sous forme de graphite et de puissantes couches de calcaires qui se sont constitués de toute évidence à partir d'une vase calcaire organique, permet de croire que la vie existait déjà dans la deuxième moitié de cette époque. C'est pourquoi on l'appelle également archéozoïque, ce qui veut dire ère de la vie la plus ancienne (du grec "arkhaios", antique ou ancien et "zoé", vie).

Le laps de temps suivant, pendant lequel se sont formées des couches de sédiments moins modifiés et, par conséquent, souvent difficilement discernables des couches plus récentes et contenant sans aucun doute des restes de plantes et d'animaux, est appelé ère protérozoïque ou éozoïque (du grec "protéros", le premier, ou "éôs", aube et "zoé", vie).

On réunit parfois ces deux ères en une seule en l'appelant archéenne ou précambrienne; mais il est plus juste de les considérer séparément, car chacune d'elles est extrêmement longue. De plus, l'ère protérozoïque est séparée de l'archéenne par un



Fig. 235. La vie au fond de la mer cambrienne: *au premier plan* — trilobites de plusieurs genres, vers, étoiles de mer; *à l'arrière-plan* — algues, éponges, crustacés nageurs, méduses.

grand intervalle, pendant lequel a eu lieu la dislocation des roches archéennes avec des intrusions importantes; les montagnes de plissement formées par suite de ces dislocations ont été fortement érodées avant que ne commencent les dépôts de l'ère protérozoïque. Ces interruptions de longue durée constituent d'excel-

lents indices pour délimiter les ères. Caractérisées par les dislocations, l'érosion et l'absence de la sédimentation, elles sont naturellement privées de fossiles, ce qui entrave fortement l'établissement de leur durée. On les rapporte à l'ère précédente qu'elles terminent.

L'ère protérozoïque se termine également par un intervalle de ce genre, après quoi commence l'ère paléozoïque ou primaire, c'est-à-dire l'ère de la vie ancienne (du grec "palaïos", ancien), qui présente de nombreux vestiges d'une vie variée en développement rapide. Ces restes permettent de diviser cette ère en périodes, c'est-à-dire en laps de temps moins longs, qui sont, en commençant par les plus anciens: le cambrien, le silurien, le dévonien, le carbonifère et le permien. Cette ère est caractérisée en général par la prédominance des classes inférieures d'animaux et de végétaux, par l'apparition des animaux terrestres et par un extrême développement de la flore sur la terre ferme. On distingue durant cette ère deux cycles de dislocation: le calédonien et le varissien ou hercynien, chacun d'eux comprenant plusieurs phases, plusieurs cycles d'érosion et de volcanisme, deux ou trois grandes transgressions, une grande régression et une glaciation à la fin.

Pendant la période cambrienne la vie était concentrée dans l'eau, la terre ferme était encore désertique. Les crustacés (trilobites) apparaissent déjà en grand nombre, les archéocyathidés, organismes originaux qui occupent une place intermédiaire entre les éponges et les coraux, les premiers brachiopodes et gastéropodes (fig. 235). Parmi les végétaux, les algues règnent. Au début du cambrien moyen une grande transgression marine eut lieu en Sibérie; au début du cambrien supérieur, la première phase du cycle calédonien de dislocation et une intensification du volcanisme.

La période silurienne met fin au règne de la vie marine, car vers la fin de cette période les premiers animaux terrestres font leur apparition (scorpions) ainsi que les premières plantes (psilophytons). Dans les mers les crustacés et les brachiopodes dominent, mais on voit déjà apparaître des céphalopodes, les graptolites, les coraux et les premiers poissons (fig. 236). Les archéocyathidées ont disparu. Vers le milieu et la fin de cette période se développent deux phases du cycle tectonique calédonien suivies d'une régression marine et d'un accroissement du volcanisme.

La période dévonienne se distingue par un développement considérable des végétaux terrestres. La classe des poissons at-

teint un grand développement, surtout les poissons cuirassés, qui vivaient non seulement dans la mer, mais aussi dans les embouchures des fleuves, dans les lagunes et tentaient probablement de sortir de l'eau, car certains d'entre eux étaient capables de respirer tant dans l'eau que dans l'air (fig. 237). On trouve également des traces des premiers amphibiens. Dans les mers, les brachiopodes, les mollusques de différents ordres, les coraux, les crustacés géants se multiplient; par contre, les graptolites disparaissent et les tribolites sont en décadence. La dernière phase du cycle calédonien entraîne une forte régression de la mer, suivie vers le milieu du dévonien par une transgression; à la fin de la période dévonienne commence le cycle tectonique hercynien. Le volcanisme était intense, surtout pendant la première et la dernière époque de la période dévonienne.

La période carbonifère est caractérisée par un développement extrême et une variété extraordinaire des cryptogames terrestres, qui forment d'énormes forêts sur les côtes marécageuses des mers; il en est resté des couches nombreuses et puissantes de houille, que l'on trouve en de nombreux pays (fig. 238 et 239). Divers amphibiens peuplent ces forêts, des reptiles font leur apparition, de grands insectes sillonnent les airs (libellules, papillons, coléoptères). Dans les mers, les trilobites disparaissent, les

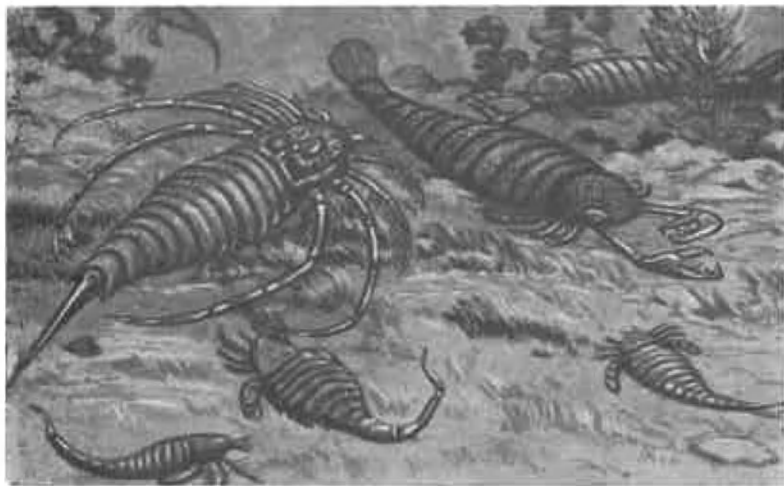


Fig. 236. La vie au fond de la mer silurienne: divers euryptéridés parmi les algues.

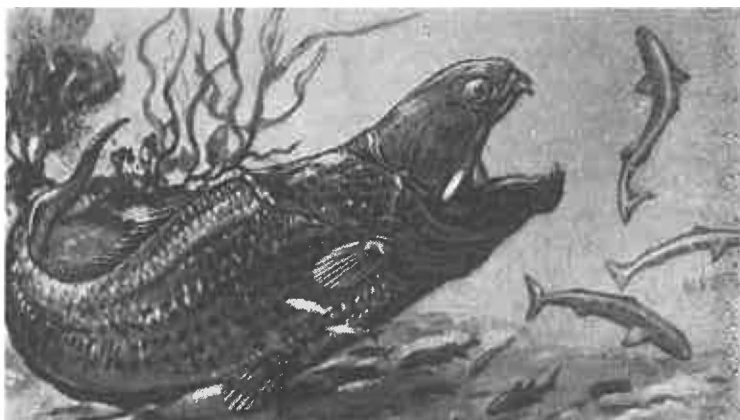


Fig. 237. La vie dans la mer dévonienne: poissons cuirassés de plusieurs genres, parmi lesquels l'énorme dinichthys.

coraux s'épanouissent ainsi que les brachiopodes, divers mollusques, de gros rhizopodes. Parmi les vertébrés le rôle principal échoit aux requins. Plusieurs phases du cycle hercynien s'accompagnent de régressions marines et de regains de volcanisme.

La période permienne, à l'inverse du carbonifère, est caractérisée par un climat froid et sec, qui entraîne une large glaciation dans l'hémisphère austral, un grand développement des déserts, une réduction des mers et la formation de lagunes avec de puissants dépôts de sels dans l'hémisphère boréal.

Ces processus étaient liés à plusieurs phases du cycle hercynien marqué par la formation de montagnes et les régressions marines; le volcanisme s'accroît fortement. Sur la terre ferme divers reptiles carnassiers et herbivores se montrent (fig. 240), dans les forêts de nombreux représentants de la flore du carbonifère disparaissent et de nouvelles plantes apparaissent; des couches de houille se forment également en différents endroits. Les trilobites disparaissent des mers, mais les céphalopodes se développent fortement, surtout les ammonites.

L'ère mésozoïque, ou l'ère de la vie moyenne (du grec "mesos", moyen) se subdivise en périodes triasique, jurassique et crétacée. Elle se caractérise par un grand développement des reptiles, et chez les mollusques — des bélemnites et des ammonites, parmi les plantes — les conifères et les sagoutiers, ayant un organisme supérieur. Plusieurs cycles d'érosion, de volcanisme et une

série de phases du cycle du Pacifique provoquaient des transgressions et régressions marines et modifiaient la face de la Terre.

La période triasique ou trias était une époque de calme relatif de l'écorce terrestre. La grande régression du trias moyen et les transgressions du trias supérieur ont été la conséquence de lents soulèvements et affaissements des continents plutôt que de la formation de chaînes montagneuses. Les reptiles dominent sur terre, les groupes principaux étant tous représentés; les premiers mammifères viennent s'y ajouter vers la fin du trias. La mer est peuplée de diverses ammonites et de reptiles marins.

La période jurassique est caractérisée par la formation intense des montagnes, les régressions marines, une grande extension de la flore terrestre, qui engendra de nombreux bassins houillers; elle occupe la deuxième place après le carbonifère pour les réserves en houille. Les reptiles sont encore mieux représentés et règnent en maîtres sur la terre et dans les eaux. Les mers se peuplent, en plus des ammonites, des bélemnites qui atteignent un grand développement; apparaissent de nouvelles formes de coraux récifaux, de bivalves et d'oursins, ainsi que les premiers oiseaux, qui entrent en concurrence avec les reptiles volants (fig. 241). Le volcanisme s'accroît vers la fin du jurassique.



Fig. 238. Forêt marécageuse de fougères et de prêles du carbonifère.

La période crétacée se distingue par une intensification des mouvements orogéniques, une grande régression au début et une transgression vers la fin, un volcanisme accru. Les premiers arbres à feuilles larges et les angiospermes apparaissent. La faune présente



Fig. 239. Dans une forêt du carbonifère : prêles et fougères, amphibiens reptiles et éryops amphibie.

les mêmes particularités que pendant le jurassique (fig. 242). L'époque est caractérisée par l'apparition de grands rhizopodes, d'éponges variées, par un dépôt de couches épaisses de craie. Les ammonites commencent à s'éteindre, les bivalves géantes se développent. Les oiseaux sont représentés par des espèces dentées.

L'ère cénozoïque ou ère de la vie nouvelle (du grec "kaînos", nouveau) est subdivisée en périodes tertiaire et quaternaire. Pendant cette ère la surface terrestre et la répartition des continents et des océans, des hauteurs et des dépressions, après une série de



Fig. 240. Paysage désertique du permien: à l'arrière-plan — saurien naosaure, au premier plan — dymétronon et d'autres sans crêtes dorsales.

transformations, atteignent leur aspect actuel. Les reptiles qui régnaient pendant l'ère mésozoïque font place aux mammifères et aux oiseaux. Vers la fin de cette ère apparaît l'homme, qui devient plus tard le maître de la Terre. Dans le monde végétal, les arbres feuillus et les graminées deviennent dominants. La

période de l'ère la plus proche de nous est caractérisée par un refroidissement du climat et plusieurs glaciations.

La période tertiaire est marquée par plusieurs phases du cycle tectonique alpin, embrassant les géosynclinaux de l'ère



Fig. 241. Sauriens volants du jurassique : ptérodactyle à peau lisse et archéoptéryx emplumé, ancêtre des oiseaux.

mésozoïque ou secondaire et les confins de la région du Pacifique, et ayant progressivement rapproché le relief de la Terre et la répartition des continents et des mers de leur état actuel. Comme conséquence de ces mouvements brusques, le volcanisme se trouve extraordinairement accru et la ceinture de feu du Pacifique se forme.

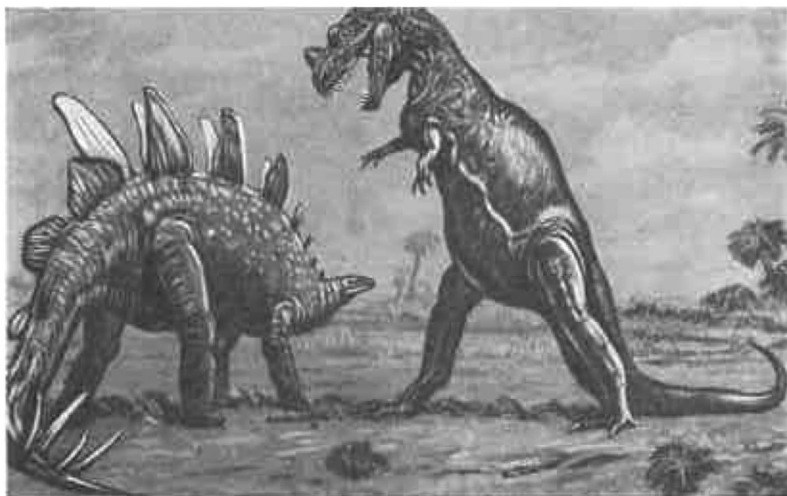


Fig. 242. Sauriens du crétacé — stégosaure herbivore à crête dorsale cuirassée et cératosaure carnassier.



Fig. 243. Paysage tertiaire: rhinocérotidé (arsinoéthérium) assailli par des hyénodons carnassiers.



Fig. 244. Forêt de la seconde moitié du tertiaire, origine de futures couches de lignite. Palmiers et conifères.

Les mammifères, qui se reproduisent rapidement, règnent ainsi que les oiseaux, les arbres à feuilles caduques et les graminées (fig. 243 et 244); dans les mers les mammifères commencent à jouer un rôle considérable (cétacés et pinnipèdes); les grands rhizopodes (nummulites), les bivalves, les gastéropodes édifient de grosses couches, alors que les ammonites et les bélemnites ont dit leur dernier mot. Le climat vers la fin du tertiaire se refroidit fortement; la première époque glaciaire, appelée gūnzienne se rapporte à cette période.

La période quaternaire, qu'on appelle également anthropozoïque pour marquer la domination de l'homme qui se poursuit jusqu'à l'heure actuelle, nous mène aux dernières phases du cycle alpin et à physionomie actuelle de la Terre. Les variations de climat provoquent trois époques glaciaires: le mindel, le riss et le wūrm, séparées par les époques interglaciaires. Dans les régions soumises aux glaciations ont lieu des migrations de la faune; les formes arctiques se déplacent vers le sud en évinçant celles des pays chauds qui émigrent encore plus au sud ou disparaissent. Pendant les époques interglaciaires le niveau des océans s'élève, la fonte de glace augmentant le volume d'eaux; des transgressions (et des régressions pendant les époques glaciaires) de la mer ont lieu. Vers le milieu du quaternaire, l'homme apparaît

en divers endroits (fig. 245), à en juger par les vestiges de son industrie (il se développait à partir des simiens et préhominidés dès avant cette époque). Des soulèvements lents des continents provoquent la formation de terrasses marines et fluviales et un rajeunissement de l'érosion.

D'autre part, des affaissements ont lieu, et l'eau inonde les terres à l'est de la Méditerranée, au sud de la mer Noire, dans le nord et l'est de la Sibérie, où Sakhaline est séparée du continent; des fosses se forment: grande fosse des lacs africains, grabens des mers Rouge et Morte et du Baikal. Le volcanisme s'affaiblit progressivement par rapport au tertiaire, quoique au début du quaternaire les volcans aient encore fumé et la lave se soit répandue dans le Caucase et en Sibérie orientale.

Classons maintenant les étapes chronologiques de l'histoire de la Terre en un tableau synoptique, en notant que les couches de sédiments correspondent à des périodes déterminées, et que les groupes de couches portent des dénominations établies. Ainsi, le terme de "groupe" désigne les couches correspondant au laps de temps appelé "ère", les "systèmes" correspondent aux "périodes". les "sous-systèmes" aux époques et les "étages" aux "âges".

Eres (groupes)	Périodes (systèmes)
1. Archéenne	
2. Protérozoïque	
	Cambrien
	Silurien
3. Paléozoïque (primaire)	Dévonien
	Carbonifère
	Permien
	Trias
4. Mésozoïque (secondaire)	Jurassique
	Crétacé
	Tertiaire
5. Cénozoïque	Quaternaire

A l'heure actuelle la plupart des géologues divisent le silurien en deux périodes distinctes et appellent le silurien inférieur ordovicien et le silurien supérieur silure ou gothlandien. On a, en général, l'habitude d'abréger les dénominations d'ères et d'époques et de dire archée, trias, carbone, dévon, jura, craie, etc.

L'âge de la Terre. Notre tableau synoptique nous donne une idée de la succession des différentes étapes de l'histoire de la Terre. Elle montre que le cambrien précède le silurien et est le premier en âge dans l'ère paléozoïque qui se termine par la

période permienne, que la période que nous vivons est la dixième des périodes établies d'une façon assez précise grâce à l'étude des fossiles ensevelis dans les couches de l'écorce terrestre; on sait que ces dix périodes ont été précédées par deux ères ayant duré très longtemps et pendant lesquelles la vie était déjà apparue. Mais ce tableau ne donne pas l'âge de la Terre exprimé en unité de temps dont nous nous servons habituellement pour l'histoire de l'humanité. Et cependant, il est très intéressant de savoir, combien d'années a duré telle ou telle période, quel est l'âge de la Terre.

Cette question a naturellement occupé les esprits des savants depuis longtemps, depuis que la science a démenti la chronologie biblique qui établissait l'âge de la Terre depuis sa création par un "être tout-puissant". D'après l'Eglise anglicane nous vivons la 5959^e année depuis la création du monde, d'après l'ancien calendrier russe nous sommes en 7464. Ces chiffres sont déjà réfutés par le calcul effectué dans le chapitre VI et qui révèle qu'il a fallu près de 2000 ans pour que le glacier arctique recule en Suède de 400 kilomètres; ce laps de temps ne représente qu'une faible partie de la dernière époque glaciaire qui a duré, comme on le suppose, près de 50 000 ans. Toute cette époque ne constitue, à son tour, qu'une petite partie de l'ère quaternaire.



Fig. 245. Hommes primitifs au travail, façonnant des silex pour leurs instruments.

Il est intéressant de noter que la chronologie biblique est en contradiction même avec les légendes et traditions des peuples. Ainsi, dans les chroniques de la Babylonie antique, il est dit que les ancêtres des Babyloniens ont gouverné le pays pendant plusieurs centaines de milliers d'années. Les traditions japonaises parlent de l'existence d'une population originelle des îles japonaises pendant des millions d'années. Les historiographes de la Chine ancienne supposaient qu'avant le règne du patriarche Yao, en 2357 avant notre ère, 3 266 000 ans s'étaient déjà écoulés, divisés en dix périodes; suivant d'autres données on compte 2 millions d'années. Ces chronologies chinoise et japonaise doivent, naturellement, être considérées comme exagérées, car la durée de toute l'ère quaternaire, comme nous le verrons plus tard, est estimée actuellement à 1 million d'années; or, elle englobe toute l'histoire de l'humanité, y compris l'âge de pierre le plus ancien, dont aucune tradition n'a pu parvenir jusqu'à nous.

On a déjà tenté de définir l'âge de la Terre par différents procédés. On a calculé le temps nécessaire à la formation du delta du Nil en se basant sur sa superficie, l'épaisseur de ses couches et la vitesse de leur dépôt par le fleuve. On a essayé d'estimer le temps nécessaire au dépôt de tous les sédiments marins en commençant par le paléozoïque, en se basant sur leur épaisseur totale et la vitesse de l'érosion des continents et en tenant compte de la superficie de ces derniers et des couches sédimentaires. On a calculé suivant le gradient géothermique le temps nécessaire à ce que la Terre se refroidisse jusqu'à son état actuel. On a appliqué la théorie de l'évolution pour déterminer le temps écoulé depuis l'apparition de la vie organique. Les données astronomiques — variations de l'excentricité de la Terre, périodes de périhélie et aphélie, déplacements du système solaire dans les limites de la Voie Lactée, excentricité de Mercure, hypothèse de l'origine de la Lune par effet de marée — ont également été utilisées pour définir l'âge de la Terre. La concentration des sels dans les océans a permis de calculer le temps qui s'est écoulé depuis le début de leur formation. Mais toutes ces méthodes ont donné des résultats très divers et sujets à caution, évaluant l'âge de la Terre de 20 à 5 000 millions d'années. Elles étaient toutes fondées sur la supposition ou bien que les processus d'érosion et de dépôt étaient aussi intenses durant les époques anciennes qu'à l'heure actuelle, ou bien sur l'hypothèse de la constance des données astronomiques, également douteuse.



Carbonifère



Tertiaire



Pléistocène

Fig. 246. Formation des continents actuels à partir du bloc primitif d'après Wegener.

Les méthodes basées sur la transmutation des éléments, découverte au XX^e siècle, ont donné des résultats bien plus probants. Toutes les matières contenant du radium se répartissent en deux séries d'éléments qui se transforment et passent progressivement d'un état à l'autre. Une de ces séries commence par le thorium, l'autre par l'uranium et toutes deux aboutissent au plomb. Le

radium est un des états intermédiaires de la série uranium-plomb. Plus on se rapproche de la fin de cette série, et plus la transmutation des éléments est rapide.

C'est pourquoi, si nous prenons une roche contenant de l'uranium et du plomb ou du thorium et du plomb et évaluons les quantités de chaque élément, nous pourrions calculer le temps écoulé depuis la formation de cette roche. Et puisqu'on peut trouver de ces minéraux dans les couches sédimentaires de différentes périodes, on pourra ainsi déterminer de cette façon l'âge de chaque période.

Une seconde méthode consiste à calculer la quantité d'hélium qui se dégage pendant les transmutations intermédiaires de l'uranium et du thorium; l'âge de la roche est établi à partir du rapport uranium-hélium ou thorium-hélium.

Une troisième méthode est fondée sur la désintégration radioactive du potassium, aboutissant à la formation d'argon. Comme le potassium est très abondant dans la nature, on peut, pour de nombreuses roches, en établissant le rapport potassium-argon, apprendre l'âge absolu de la roche. Il existe encore toute une série de méthodes basées sur la désintégration radio-active des éléments. La plus précise est la méthode au plomb; les méthodes à l'hélium et à l'argon donnent encore parfois, à l'heure actuelle, des résultats fortement erronés en ce qui concerne l'âge des roches.

Ces méthodes ont permis d'effectuer de nombreux calculs de l'âge des roches et des minéraux de différentes époques géologiques et d'obtenir les chiffres suivants quant à la durée des ères et des périodes en millions d'années (d'après la dernière table de Marble et Holmes, 1950).

Périodes	
Quaternaire	1
Tertiaire	59
Crétacé	70
Jurassique	25
Trias	30
Permien	25
Carbonifère	55
Dévonien	55
Silurien	120
Cambrien	80
<hr/>	
Total	520

La durée des ères est donc (en millions d'années):

Cénozoïque	60
Mésozoïque	125
Paléozoïque	335

Ces chiffres ne sont pas tout à fait précis, car les diverses méthodes donnent parfois des écarts de plusieurs millions d'années. Avec le temps, quand on aura effectué un grand nombre de calculs en divers pays et pour différentes époques d'une même période, ces écarts se réduiront de plus en plus. Une précision de près d'un million d'années près qui pourra être atteinte sera tout à fait suffisante, car pour les espaces de temps immenses auxquels nous avons affaire un million d'années présente, pour les époques géologiques lointaines, une quantité négligeable.

Pour conclure, cette chronologie montre que la durée des ères augmente de façon très appréciable avec leur ancienneté. Les autres données, basées sur les transformations de la face de la Terre, la détermination de l'épaisseur des couches sédimentaires des époques données et l'évolution de la vie organique nous en convainquent également.

On n'a pu encore évaluer de façon précise la durée des ères protérozoïque et archéenne, car on ignore le début exact de chacune d'elles.

On estime que les deux ères dans leur ensemble ont duré au moins 1500 millions d'années, dont 500 à 600 millions reviennent à l'ère protérozoïque. On peut estimer avec suffisamment de bien-fondé que l'âge global de la Terre depuis la formation des premiers continents et océans est de l'ordre de 2 milliards d'années.

La dérive des continents. Durant ces dernières années une hypothèse a été émise qui explique différemment la formation des mers actuelles. Elle a été proposée par le savant allemand Wegener en 1912 et par son collègue américain Taylor en 1910 (mais moins détaillée). Ces savants estiment que les saillies primitives de l'écorce terrestre se sont assemblées en un endroit de la même façon dont se coagulent et s'assemblent les petites bulles à la surface de l'eau, pour former une grosse bulle. Ainsi s'est formé le bloc primitif Pangée, aïeul des socles continentaux, qui unissait tous les continents actuels, y compris l'Antarctide. Plus tard, au carbonifère, le Pangée a commencé à se dissocier en donnant naissance à l'Australie et l'Antarctide qui se sont éloignées vers le Sud, et à l'Amérique qui a dérivé vers l'Ouest.

Cette dérive dura des dizaines de millions d'années et la fosse de l'Atlantique, qui sépare les deux Amériques de l'Europe et de l'Afrique, ne s'est formée qu'à l'ère tertiaire en n'adoptant ses formes actuelles qu'au quaternaire (fig. 246). L'idée que les continents étaient peut-être autrefois soudés est née en regardant

la carte: les contours des côtes est et ouest de l'Atlantique coïncident, en effet, surtout ceux de l'Afrique et de l'Amérique du Sud; si on les unissait par-dessus l'océan, les bords se toucheraient presque partout, les vides partiels pouvant s'expliquer facilement par l'érosion. Le savant russe E. Bykhanov a, le premier, en 1877, remarqué cette particularité.

Mais la question qui se pose alors est de savoir pourquoi les continents se sont d'abord unis pour se fragmenter plus tard?

Wegener pense, que la division du Pangée est la conséquence de la giration de la Terre. La Terre tourne autour de son axe dans le sens ouest-est, et la partie occidentale du Pangée devait par inertie retarder et se détacher de la partie orientale, en obéissant à la loi suivant laquelle toute masse tend à demeurer en place, et s'opposant de ce fait à la force du mouvement giratoire de la Terre, dirigée vers l'Est. On effectue à l'heure actuelle la détermination précise de la position des côtes de l'Atlantique pour savoir si les continents se sont séparés ou non.

Mais vous vous demanderez, certainement, comment les masses énormes des continents peuvent se déplacer, même très lentement, à la surface de la Terre.

Vous connaissez la force de la pesanteur, conséquence de l'attraction exercée par la Terre. C'est grâce à cette force que nous pouvons nous maintenir à la surface de la Terre malgré son rapide mouvement giratoire. C'est grâce à elle que la pierre ou la balle que vous jetez en l'air retombe. C'est grâce à cette force également que le globe terrestre est formé de plusieurs couches successives de différente composition; quand il était incandescent, les éléments les plus lourds comme le fer, le plomb et les autres métaux se sont concentrés en grandes masses près du centre de la Terre, alors que les éléments plus légers demeuraient à la surface et formaient en se refroidissant la croûte terrestre. C'est pourquoi Wegener a conclu que les continents, constitués de matières plus légères, flottent sur une couche intérieure basaltique plus lourde, comme les glaçons flottent sur l'eau. S'ils flottent, ils peuvent se déplacer, mais très lentement, de toute évidence, car la couche basaltique est bien plus visqueuse que l'eau.

Cette couche supérieure, formée de roches où dominent la silice et l'aluminium, est appelée "sial" (des deux premières syllabes des mots silice et aluminium), et la couche inférieure, plus lourde, sur laquelle flotte le sial, est nommée "sima", car elle contient, outre la silice, beaucoup de magnésium.

L'hypothèse de Wegener explique la formation de la chaîne montagneuse des Andes et des Cordillères qui borde les deux Amériques par le fait que le déplacement de ce continent vers l'Ouest a entraîné une forte compression des couches sédimentaires de la côte occidentale, conséquence de la résistance du sima à la pression du sial.

Cette hypothèse, qui avait d'abord séduit un grand nombre de savants, soulève beaucoup d'objections, notamment parce que la disposition de certaines chaînes montagneuses sur la surface de la Terre ne cadre pas avec elle et entre même en contradiction avec cette hypothèse. Il n'y a pas, en effet, de chaînes montagneuses en Afrique et en Europe le long des côtes occidentales, quoique ces continents, eux aussi, se déplacent vers l'Ouest, par suite du mouvement de rotation de la Terre vers l'Est. En Asie, par contre, les chaînes montagneuses suivent les côtes orientales, qui, d'après cette hypothèse, ne sont pas soumises à la pression du sima.

Les géologues considèrent à l'heure actuelle que l'hypothèse de la dérive des continents ne peut expliquer de façon satisfaisante les transformations de la face de la Terre.

XI

LES CATASTROPHES DANS L'HISTOIRE DE LA TERRE

Qu'est-ce qu'une catastrophe ? Les inondations. Les torrents de boue. Les éboulis, glissements de terrain et effondrements. Les ouragans : simouns et typhons. Les avalanches. Les éruptions de volcans : Vésuve, montagne Pelée, Banday-san, Krakatoa, Santa-Maria. Les tremblements de terre : Lisbonne, Messine, Crimée, Alma-Ata, Caucase, Amérique, Nouvelle-Zélande, Japon. Les catastrophes du passé. Sodome et Gomorrhe. L'Atlantide. Les transgressions et régressions. Les glaciations. Disparition de la flore et de la faune. Les cimetières. Le déluge universel.

On appelle catastrophe un événement quelconque qui arrive subitement, s'écoule en un laps de temps relativement court et entraîne la perte de vies humaines ou de biens meubles ou immeubles. Les déraillements, les accidents d'automobiles, les écroulements de maisons, la chute d'un avion, les incendies sont des catastrophes de très courte durée. Les catastrophes provoquées par les forces de la nature sont elles aussi souvent subites et courtes, comme les éboulements, les avalanches, les tremblements de terre, mais peuvent également durer des heures, des jours, et même des semaines, comme les inondations, les glissements de terrain, les éruptions de volcans. On peut prévoir ces catastrophes et prendre en temps utile des mesures de sauvegarde ; elles ne sont plus soudaines, fortuites, quoiqu'on les appelle toujours catastrophes. Ainsi, par exemple, on peut appeler les épidémies, la famine, les guerres catastrophes dans l'histoire de l'humanité, car ce sont des événements qui troublent le cours normal de la vie.

On appelait autrefois, en géologie, cataclysmes les événements soudains qui provoquaient des destructions. Durant la prime

enfance de cette science, on leur attribuait un caractère général et, citant le déluge universel à titre de preuve irréfutable, on s'en servait pour expliquer les époques géologiques. Au XVIII^e siècle, le grand géologue français Buffon prouvait dans son fameux ouvrage en dix volumes, *Les époques de la nature*, qu'à la fin de chacune de ces époques se produisaient des cataclysmes grandioses : éruptions de volcans, tremblements de terre, inondations, qui transformaient complètement la face de la Terre et anéantissaient tous les êtres vivants, qui étaient recréés au début de l'époque suivante sous une forme plus parfaite. Cette théorie des catastrophes périodiques jouissait à l'époque d'une grande faveur et domina jusqu' vers les années 30 du XIX^e siècle, moment où Lyell a montré que l'histoire de la Terre est une transformation continuelle de sa face par les mêmes forces naturelles que nous observons de nos jours, alors que les catastrophes ne sont que des phénomènes rares et fortuits. Plus tard Darwin démontra que le monde organique lui aussi est soumis à cette loi d'évolution lente et continue, et non pas à une disparition et une renaissance périodiques.

Quoique la théorie de Buffon soit actuellement rejetée, et bien qu'il ait été prouvé que les catastrophes ne jouent pas un rôle prépondérant dans la transformation de la face de la Terre, il faut toutefois admettre que leur importance n'est pas à négliger. Cela concerne surtout les catastrophes d'assez longue durée, car elles entraînent une grande destruction de ce qui existe et la création de formes nouvelles.

C'est pourquoi nous consacrons tout un chapitre à ces événements dans l'histoire de la Terre.

Ne doit-on pas considérer comme catastrophiques, malgré leur énorme durée, les premiers siècles de l'histoire de la Terre décrits dans les chapitres précédents ? La croûte terrestre à peine formée éclatait en maints endroits, et des torrents de lave s'épandaient à la surface ou jaillissaient en jets de flammes lors des explosions soudaines de gaz. Dans l'atmosphère extrêmement dense, saturée de vapeurs et de gaz, de monstrueuses décharges électriques se produisaient sous forme de foudres qui frappaient les rochers. Plus tard, quand les mers ont commencé à se former, les tressaillements et les ruptures de la croûte terrestre se poursuivaient, les éruptions volcaniques atteignaient peut-être une force encore plus grande et des averses terribles accompagnées d'éclairs et de

tonnerre fouettaient la terre et les eaux. Ce n'est que peu à peu que ces catastrophes, de quotidiennes et prolongées qu'elles étaient, devenaient plus courtes et plus rares, rendant possible l'apparition et le développement de la vie, qui durant les premières époques aurait été immédiatement détruite.

Revenons maintenant à l'actualité et faisons connaissance avec les catastrophes de différent type.

Les inondations. Commençons, en suivant l'ordre, par l'activité de l'eau courante. Cet agent d'érosion travaille constamment et régulièrement. Mais par moments, les rivières et les fleuves débordent et submergent les régions environnantes. On appelle ce phénomène inondation, elle est capable de causer des dégâts plus ou moins considérables. Toute crue printanière peut se transformer en inondation, si les chutes de neige sont abondantes en hiver et leur fonte rapide produit plus d'eau que les lits des cours d'eau ne peuvent en contenir. Dans les régions à hiver doux, les inondations en automne ou en hiver ne sont pas rares, par suite des fortes pluies ininterrompues amenant une augmentation excessive du volume d'eau. La France méridionale, l'Espagne, l'Italie ont souvent à souffrir d'inondations de ce genre. En d'autres pays, les inondations sont produites par d'abondantes pluies d'été. Ce sont, par exemple, les régions avoisinant le lac Baïkal et surtout le bassin de l'Amour et la Province Maritime de l'U.R.S.S., alors que les crues printanières y sont inoffensives, par suite de la rareté des chutes de neige.

Ce ne sont pas les pluies, mais le vent qui provoque les inondations dont souffre Léninegrad surtout en automne: les vents du golfe de Finlande qui soufflent de l'ouest chassent les eaux dans l'embouchure de la Néva, arrêtent leur écoulement, font monter son niveau et la font sortir de ses rives, inondant les rues de la ville située sur un delta plat. Il n'est pas rare que l'eau monte en automne, mais des irrptions d'eau catastrophiques ont été notées une fois par siècle; les dernières en date ont eu lieu en 1824 et en 1924. Elles sont caractéristiques pour les régions basses des embouchures des fleuves Indus, Gange, Hoang-ho, Yang-tse-kiang, et sont provoquées par des tempêtes en mer qui empêchent l'écoulement des eaux. Les côtes basses peuvent être submergées même en dehors des embouchures, quand les vents marins sont très forts; ç'a été le cas sur les côtes de l'Allemagne, des Pays-Bas et de l'Angleterre lors de très fortes tempêtes dans la mer du Nord et la Baltique.

Le fleuve quittant son lit détruit les routes, endommage les chaussées (surtout si elles sont en bois, car les pavés surnagent et sont entraînés), couvre de sable et de vase les prés et les labours, sape les fondations des maisons de pierre et arrache facilement les maisons en bois qui sont entièrement emportées. Dans les maisons qui résistent, les caves sont envahies par l'eau, ainsi que les étages inférieures qui, après la baisse des eaux, restent longtemps humides. Les bûchers et les stocks de bois sur les quais et dans les cours peuvent disparaître totalement. Tous les stocks de denrées alimentaires et de marchandises périssent dans les locaux inondés, les machines se rouillent.

Nous décrirons, comme exemple, deux inondations.

Le Hoang-ho dans son cours inférieur coule dans la Grande plaine chinoise par endroits au-dessus du niveau de la plaine environnante, en raison de l'enlèvement du cours du fleuve qui charrie le loess amené des régions montagneuses de la Chine. C'est pourquoi le cours inférieur du fleuve est bordé de digues de terre. Chaque année, les crues détruisent une partie ou une autre de ces digues, et le fleuve inonde le pays sur une étendue plus ou moins grande, avec ses labours, ses jardins fruitiers et ses villages. La population luttait constamment contre la rupture des digues et appelait le fleuve "fléau de la Chine". Après la libération du pays, le gouvernement de la République populaire de Chine a entrepris d'importants travaux hydrotechniques pour écarter la possibilité de rupture de ces digues. Le trop-plein du Hoang-ho est dirigé dans les systèmes d'irrigation et les canaux navigables.

Aux Etats-Unis d'Amérique, durant la deuxième moitié de janvier 1937, des pluies torrentielles prolongées succédant aux chutes de neige provoquèrent une inondation sans précédent. Tous les affluents du Mississipi, particulièrement l'Ohio, l'Arkansas, le Red-River, virent leur niveau monter, et le 25 janvier la menace d'un déluge était imminente. Plus d'un million d'hommes étaient déjà victimes du désastre, et le 27 janvier il fallut évacuer toute la population de la vallée du Mississipi en aval de l'Ohio sur une largeur de 80 kilomètres de part et d'autre du fleuve, cette partie de la vallée risquant d'être submergée. A elle seule, la rivière Ohio déversait 135000 hectolitres par minute, et il devenait évident que les barrages édifiés le long du Mississipi, en prévision des inondations et capables de contenir un courant de 108000 hectolitres par minute, ne pourraient résister à la poussée. Dès le premier jour, 35000 camions avaient été amenés à pied d'œuvre, mais

un grand nombre d'entre eux ne purent quitter à temps la zone submergée. L'eau envahissait en aval de nouvelles villes et dans la plupart des cas les habitations, notamment celles en béton, s'écroulaient en quelques heures; ainsi les habitants qui se réfugiaient aux étages supérieures des immeubles périssaient. Le courant atteignait une vitesse énorme: jusqu'à 56 kilomètres à l'heure, et le fleuve emportait tous les édifices. Dans certaines villes, plus des 3/4 des habitations furent détruites en un seul jour et la plupart des habitants restèrent sans abri; dans la partie haute de Louisville, demeurée intacte, des incendies se déclarèrent par suite de la détérioration de réservoirs d'essence. Des bandes de gangsters, arrivés sur les lieux en canots à moteur, s'occupaient de pillage au lieu de prêter assistance aux sinistrés. Les pluies persistantes et le froid aggravaient le désastre. Les dégâts s'élevèrent à 2 ou 3 milliards de dollars.

Dans les pays à climat sec, l'arrivée soudaine de fortes averses entraînant la formation de torrents impétueux provoque également des catastrophes. Ainsi, à Alma-Ata le 8 juillet 1921 après midi, une averse terrible tomba qui dura quatre heures. Vers le soir, la rivière Malaïa Almaatinka, qui descend du Tian-Chan, sortit de ses rives et déferla sur la ville en vagues atteignant de 1 à 2 mètres de haut, entraînant de grands sapins arrachés aux flancs des montagnes, des planches et des madriers provenant des maisons de campagne détruites par les eaux dans la vallée montagneuse. Le flux principal suivait la rue centrale emportant les maisons de bois avec tous leurs habitants; mais l'eau envahissait également les rues adjacentes et les cours, provoquant partout des destructions. Beaucoup d'habitations en pisé furent détériorées et des maisons en bois déplacées. Le torrent charriaient une grande quantité de gravier, de galets et de blocs de pierre dont le poids atteignait plusieurs tonnes et abandonna tous ces matériaux en une couche d'un mètre et demi d'épaisseur. Une fondrière de deux mètres se creusa dans la partie supérieure de la rue principale et des blocs d'un poids allant jusqu'à 25 tonnes s'y sont trouvés engagés. Beaucoup de personnes entraînées par le courant furent noyées: on comptait plus de 500 disparus. Vers minuit, le torrent cessa. D'après un calcul très approximatif il apporta dans les rues de la ville 3,6 millions de tonnes de matériaux solides, et comme il avait sévi cinq heures, cela faisait 200 tonnes par seconde. Ce même jour des torrents destructeurs venus des montagnes ont été observés à 25 kilomètres à l'ouest et 60 kilomètres à l'est



Fig. 247. Embouchure du ravin Biéchnaïa balka (ravin Enragé), sur le versant de la rive gauche de la Koura à Borjomi, après le passage du torrent boueux au début d'août 1912.

d'Alma-Ata. La majeure partie des précipitations atmosphériques s'était déversée sur les montagnes: il n'était tombé ce jour-là que 27 millimètres de pluie à Alma-Ata même.

Une averse catastrophique tomba le 29 juin 1934 dans les montagnes Khamar-Daban, sur la rive sud du lac Baïkal, près de la station de chemin de fer Slioudianka. Pendant trois jours, il avait plu sans discontinuer dans les montagnes, le sol était saturé d'eau et, le dernier jour, des torrents ruisselaient jusque dans les plus petites vallées, habituellement privées d'eau. Sur les versants, l'eau s'écoulait en nappe ininterrompue. Dans la nuit du 28 au 29 juin, la rivière Slioudianka débordait et se précipitait en un torrent énorme et impétueux, submergeant la station,

emportant huit maisons, broyant le barrage de béton du réservoir et le réduisant en morceaux et blocs dont elle emporta une partie dans le Baïkal. Tous les potagers furent détruits, et à leur place gisaient d'énormes pierres d'un mètre à un mètre et demi de diamètre. Près de la station, les voies étaient couvertes d'une couche de sable et de vase d'un mètre d'épaisseur. Plusieurs convois étaient enlisés jusqu'au-dessus des boggies. Sur les voies même, suivant les estimations, il y avait plus de 153 000 mètres cubes de sable et de vase. Par endroits, la rivière s'était creusé un nouveau lit, profond de 6 mètres, et avait entraîné dans le Baïkal une grande quantité d'arbres. Dans les montagnes, le sol devenu meuble glissait et s'écroulait par pans entiers. Dans la vallée de la Slioudianka, à quelques kilomètres en amont du village, près d'une carrière, se trouvait depuis des temps immémoriaux un énorme bloc dépassant la hauteur d'un homme. Après cet événement il avait disparu. Dans le village même il n'était tombé en ces trois jours que 50 millimètres de pluie contre 500-600 millimètres au moins dans les montagnes.

J'ai vu un terrible torrent de boue en 1912 à Borjomi, en Transcaucasie. Après une pluie courte mais torrentielle, le ravin



Fig. 248. Dépôt formé par la Biéchénaïa Balka encombrant la route sur la rive gauche de la Koura à Borjomi en août 1912.

Enragé (Biéchénaïa balka), sur le versant gauche de la vallée de la Koura, a déjeté dans cette vallée une masse énorme de pierres, de sable et de vase, qui recouvrit la chaussée d'une couche de deux mètres qu'on mit ensuite plusieurs jours à déblayer. Ce ravin s'appelle Enragé justement parce qu'après chaque averse il charrie de grandes quantités de débris rocheux. Ce ravin n'est pas grand mais ramifié, et ses versants abrupts sont presque entièrement dénudés; l'eau entraîne rapidement une grande quantité de matériaux et se transforme dans le fond du ravin en torrent saturé de pierres et de boue (fig. 247 et 248).

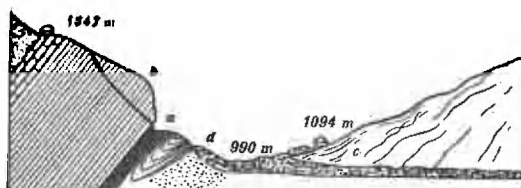


Fig. 249. Éboulement près du village d'Elme, en Suisse.

a — carrière; b — masse des schistes effondrés;
c — surface encombrée par les débris; d — emplacement du village enseveli.

Les éboulements sont souvent des catastrophes provoquées par l'érosion, les tremblements de terre, les travaux inconsidérés de l'homme.

Les masses de roches se détachant des versants abrupts couvrent les routes, anéantissent les forêts, les jardins, détruisent les édifices et entraînent des pertes de vies humaines. Ainsi, par exemple, en hiver 1923, sur la Côte Sud de la Crimée, un bloc de plus de trois mètres de diamètre se détacha du rocher du Chat et détruisit la moitié d'une maison au pied du rocher. Nous allons décrire plusieurs éboulements qui ont causé de grands dommages.

En 1881, en Suisse, le flanc d'une montagne près du village d'Elme s'écroula par suite d'une exploitation défectueuse de la carrière s'y trouvant. Une masse de roche de 10 millions de mètres cubes fut précipitée d'une falaise de 70° et roula avec une force telle, que des éclats tombèrent sur le versant opposé de la vallée à une hauteur de 100 mètres et d'autres furent rejetés de côté jusqu'à 1500 mètres de distance. L'éboulis couvrait une

surface de 89 hectares, il détruisit 83 bâtiments et ensevelit 115 personnes. Le tout dura moins de deux minutes (fig. 249).

En 1911, dans le Pamir, un tremblement de terre arracha au versant escarpé de la vallée de la rivière Bartang, près du village Sérez une masse de 2200 millions de mètres cubes, qui ensevelit toute la vallée avec le village et forma un énorme barrage qui, en retenant le cours de la rivière, donna naissance à un grand lac. On craignait que son écoulement ne détruise les terrains meubles de cet éboulis, ce qui aurait pu provoquer une inondation devastatrice en aval, dans la vallée fertile, à la population assez dense. Il n'en fut rien, et la masse de l'éboulis atteignant 6 milliards de tonnes s'est trouvée tellement solide que son érosion est très lente et le lac existe encore à l'heure actuelle (fig. 250).

Pendant le tremblement de terre de 1887, près de la ville de Verny (aujourd'hui Alma-Ata), dans la vallée Ak-Djar de la chaîne montagneuse de l'Alataou, un éboulement eut lieu d'une hauteur de 300 mètres et sur une surface de 2,8 millions de m². D'énormes blocs de granit, de dyorite et de schistes atteignant 500 tonnes emplirent toute la vallée et formèrent un manteau d'éboulis rocheux de 2 kilomètres de long, 200 mètres de large, 100 mètres d'épaisseur, et d'un volume de 40 millions de mètres cubes. Cette vallée boisée et florissante devint un véritable désert. Pendant ce tremblement de terre, ainsi que durant le suivant, en 1911, de nombreux éboulements ensevelirent les iourtes de Kazakhs



Fig. 250. Eboulis d'Oussoï dans le Pamir : *au premier plan* — la masse de l'éboulis, *à gauche et à droite* — les lacs Chadaou-Koul et Sérez, qui se sont formés au-dessus des éboulis.

nomades. La masse totale des éboulis de cette région pour l'année 1887 était estimée à 440 millions de mètres cubes et a fourni un travail mécanique énorme.

Dans le Caucase, en 1898, dans la gorge Dalskoïé de la rivière Kodor (région de Soukhoumi), un éboulement donna naissance à un barrage de 150 mètres de hauteur et à un lac énorme qui se forma au-dessus de lui et exista pendant plusieurs semaines. Au XVIII^e siècle, sur la Côte Sud de la Crimée, près du village Koutchouk-Koï, un énorme éboulement de calcaires issu de la chaîne Yaïla vint s'abattre, couvrant et repoussant jusqu'à la mer beaucoup de maisons et de jardins. La description des éboulements des siècles passés seulement pourrait occuper tout un volume.

Les glissements de terrain peuvent également être rapportés aux catastrophes géologiques, quoique se déroulant bien plus lentement que les éboulements. Ce sont des déplacements de masses plus ou moins importantes glissant sur le flanc des montagnes ou les versants des vallées pendant des minutes, des heures et même des jours. Ils sont causés par l'activité des eaux souterraines, sont souvent la suite immédiate des tremblements de terre, de l'affouillement de la partie inférieure du versant par l'eau courante ou le ressac, ainsi que la conséquence de travaux de terrassement ou de la pression exercée par les bâtiments construits sur le versant.

La description de glissements catastrophiques emplirait elle aussi bien des pages, mais nous nous en tiendrons à quelques exemples.

Des glissements de terrain typiques ont eu lieu en Angleterre au bord de la mer près de Lyme-Regis. La côte est ici formée de craie blanche, de grès, de silex et de sable meuble du crétacé, reposant sur une couche imperméable d'argiles jurassiques. Les strates sont inclinées vers la mer et les eaux souterraines s'écoulent sur la couche d'argile par de nombreuses sources en créant des conditions favorables pour le glissement des couches sus-jacentes. Après la saison pluvieuse de 1839, ces couches imbibées d'eau et devenues de ce fait plus lourdes s'ébranlèrent, et le 24 décembre toute la côte se mit en mouvement, se divisant en énormes blocs par des crevasses et des ravins, et glissa vers la mer. La pression de la masse fit surgir du fond de la mer une crête longue de 1 kilomètre et haute de 12 mètres, constituée par des blocs arrachés à la falaise, couverte d'algues marines, de coquillages, d'étoiles de mer, etc., et formant à l'heure actuelle une série de rochers.

Près d'Odessa, les couches supérieures de la côte sont constituées d'argiles tertiaires, sous lesquelles se trouve une couche de calcaires reposant sur des argiles bleues; les eaux souterraines s'écoulent sur ces dernières et provoquent des glissements périodiques (fig. 251). De gros blocs se détachent de la côte, glissent, se renversent, toute cette côte est coupée de crevasses et de ravins, alors que des bancs surgissent du fond de la mer. Ces glissements réduisent systématiquement la superficie des villégiatures les plus pittoresques, détruisant les jardins et démolissant les édifices. Les dimensions des glissements ont augmenté depuis que l'on exploite les carrières de meulière pour les constructions urbaines et que celles-ci, largement ouvertes, ont facilité aux précipitations atmosphériques l'accès à la couche des argiles inférieures.



Fig. 251. Coupe de glissements de terrain près d'Odessa.

a — argile, *b* — calcaire, *c* — argile bleue, *d* — bombement du fond de la mer, *e* — masse du glissement. Le pointillé indique le profil de la côte avant le glissement.

La Côte Sud de la Crimée souffre de glissements de terrain sur presque toute sa longueur. Ici la surface de schistes et de grès fortement plissés du trias et du jurassique inférieur est couverte d'une puissante couche de déluvions grossières, provenant de la destruction et des éboulements des puissantes couches de calcaires du jurassique supérieur formant les falaises du Yaïla. Les précipitations atmosphériques ainsi que les eaux des sources du Yaïla pénètrent ces déluvions, et elles glissent sur les versants raides de schistes en même temps que les constructions et les jardins qu'elles supportent, se crevassent détruisant les maisons. Le littoral de la mer Noire de Touapsé à Soukhoumi est également instable; les causes immédiates des glissements sont ici surtout les ressacs et les travaux de terrassement effectués pour établir des routes et des voies de chemin de fer.

La rive droite de la Volga en différents endroits: à Oulianovsk, Volsk, Saratov, Syzran, Batraki et ailleurs, glisse souvent, car elle est formée de couches alternées perméables et imperméables, inclinées vers le fleuve. Les conditions naturelles favorisant les glissements de terrain sont encore renforcées par l'imprudence des hommes qui creusent les parties inférieures des versants et chargent les parties supérieures de bâtisses qui s'écroulent inévitablement avec le temps. Autrefois l'absence d'égoûts dans les

villes augmentait les quantités d'eau qui pénétraient jusqu'aux couches aquifères.

La côte ouest du lac Baïkal, de la source de l'Angara à la station Kouloutouk, résulte d'une grande faille ayant engendré la profonde dépression qu'occupe le lac. On n'a pas tenu compte de cette circonstance lors de l'établissement de la voie ferrée qui longe le lac; de nombreux tunnels et tranchées coupent les extrémités des promontoires entre les vallées trop près de la côte escarpée, où les roches dures sont coupées de fissures parallèles au plan de faille et instables de ce fait. Des éboulements des parois



Fig. 252. Cap "Les Deuxièmes Piliers" du lac Baïkal avec plans de faille de part et d'autre du tunnel.

des tranchées dans les courbes de la ligne, des chutes de blocs des voûtes des tunnels se produisent par suite de légers mouvements qui ont encore lieu à proximité de la faille (fig. 252).

Les effondrements du sol sont provoqués par l'action dissolvante des eaux souterraines dans le gypse ou le calcaire et la formation de grottes et cavités souterraines, dont la voûte s'écroule, comme nous l'avons décrit au chapitre III. Ce sont parfois des catastrophes, quand des bâtisses entières

s'effondrent. L'homme provoque de telles catastrophes en pompant l'eau des puits artésiens (si ce pompage fait naître des vides), en extrayant l'eau avec du sable d'une couche aquifère ou d'un gîte lentiforme.

C'est ainsi que s'explique la chute du clocher de l'église Saint-Marc à Venise et la destruction de 14 maisons autour d'une place de la ville de Pila (Pologne), où l'on avait foré un puits d'où l'on extrayait de l'eau avec du sable.

Les ouragans sont souvent la cause de catastrophes, parfois très étendues. Les ouragans de sable de l'Afrique caractérisent la zone du Sahara, où on les appelle khamsin ou chamsin; les Arabes appellent ce même vent simoun. Une heure déjà avant un simoun on aperçoit vers le sud de lourds nuages jaunes, l'air devient suffocant, les hommes sont inquiets, même les chameaux manifestent des signes d'inquiétude. L'ouragan de sable assourdit certaines gens, on signale même des cas de mort, sans

doute par suite d'un coup de chaleur. C'est pourquoi on attribue au simoun un pouvoir toxique. Les grains de sable pendant le simoun s'électrissent et les vêtements de laine peuvent donner des étincelles. Le simoun est particulièrement dangereux dans les sables mouvants, où les dunes se transforment en une mer de sable agitée. Si une caravane est surprise par le simoun, on fait s'accroupir les chameaux le dos au vent, et les hommes se couchent à leur abri en se couvrant avec des couvertures; on est obligé de se boucher les oreilles et le nez avec du coton et de retenir sa respiration pour que les poumons ne soient pas emplis de poussière de sable. Une fois le simoun passé, il faut déterrer les chameaux du sable qui les couvre. Il ne dure habituellement que quelques heures, mais s'il se prolonge, la caravane est irrémédiablement perdue.

L'invasion des champs, des jardins, des villages et des villes par les sables des dunes marines ou continentales peut également être appelée catastrophe, quoique cet ensablement soit très lent, dure des mois et des années. Des cas d'ensablement rapide d'oasis sont connus, mais ils sont extrêmement rares.

Les ouragans qui sévissent par moments le long des côtes orientales de l'Asie et de l'Amérique du Nord sont bien plus terribles. On les appelle en Asie "typhons" (en chinois "taï" signifie grand et "foung" vent); ils naissent près du tropique du Cancer et soufflent en direction du nord, le long des côtes de la Chine et sur les îles des Philippines et du Japon. En Amérique, leur berceau se trouve dans la mer des Antilles et ils soufflent sur les côtes sud et est des Etats-Unis. Ces ouragans s'abattent avec une force effrayante, déracinent des arbres, renversent les poteaux télégraphiques, arrachent les toits et les constructions légères; ils s'accompagnent de pluies diluviennes et, sur les bords de la mer, de vagues inondant les côtes sur une certaine étendue. Les typhons ont toujours pour conséquence des pertes matérielles et des morts de personnes et d'animaux tués par les débris ou noyés.

Les ouragans sévissent parfois en d'autres endroits, mais ils atteignent rarement la force des typhons. Mentionnons les tempêtes de poussière qui ont lieu au printemps en Ukraine et emportent des couches de terre des champs ensemencés, mettant à nu les grains et même parfois les racines des blés d'automne, les vents secs d'outre-Volga soufflant des déserts de l'Asie centrale et anéantissant la végétation, le bora de Novorossiisk, ouragan qui recouvre d'une couche de glace les maisons, les rues, les navires dans le port, et cause de grands ravages.



Fig. 253. Glissements de sédiments tertiaires et quaternaires sur les bords de la rivière Tomi, en amont de Tomsk.



Fig. 254. Mur de protection au bord de la Baltique détruit par l'ouragan en décembre-janvier 1913-1914 (île Ouzédom).

Les avalanches dans les pays montagneux sont des catastrophes se répétant annuellement. De grandes masses de neige peuvent s'accumuler sur les versants abrupts à l'abri du vent. Ces masses finissent par se détacher et dévalent les pentes en produisant des avalanches qui causent plus ou moins de dégâts.

On distingue les avalanches sèches ou poudreuses, les avalanches humides et les avalanches glaciaires.

Les avalanches sèches ont lieu en hiver après les fortes chutes de neige sans dégel, quand les amas de neige sur les crêtes et les versants abrupts atteignent des dimensions telles que la vibration de l'air produite par un coup de vent, un coup de feu ou même un éclat de voix peuvent les mettre en mouvement. L'avalanche est facilitée si la neige est tombée sur la surface lisse de l'ancienne neige fondue, puis gelée. Ces avalanches se précipitent vers le pied de la montagne et soulèvent tout un nuage de poussière neigeuse qui emplit l'air (fig. 255).

Les avalanches humides se produisent en hiver après de grandes chutes de neige accompagnées d'un fort dégel, ainsi qu'au printemps pendant la fonte des neiges, et sont constituées de neige plus ou moins collante, imbibée d'eau. Ces masses deviennent lourdes en fondant et la roche sous-jacente glissante, par suite de l'humidité; la neige se décolle et glisse vers le bas, en entraînant chemin faisant celle des versants; des blocs isolés roulent en amassant la neige. La surface de ces avalanches est très inégale; il ne se forme pas de nuage de poussière neigeuse (fig. 256).



Fig. 255. Avalanche poudreuse dans les Alpes suisses.

Les avalanches glaciaires sont les langues des glaciers suspendus qui sont arrachées de temps en temps à la masse principale et dévalent les pentes, sous forme d'un chaos de décombres atteignant le pied du versant. Comme leur nom l'indique, elles sont composées de glace.



Fig. 256. Avalanche humide dans les Alpes suisses.

Les avalanches causent beaucoup de dommages dans les pays montagneux : elles détruisent les forêts sur leur passage, encombrement les vallées fluviales, les routes et les voies ferrées en interrompant la circulation, ensevelissent les maisons et dépendances avec leurs habitants et les animaux domestiques, arrachant souvent les toits, enfonçant les murs et les fenêtres. L'épaisseur de la neige, là où l'avalanche s'est arrêtée, atteint souvent 10 à 20 mètres, ce qui fait

qu'il faut creuser de profondes tranchées pour dégager les maisons et sauver les hommes et les animaux. On peut se faire une idée des préjudices causés par les avalanches par la statistique suivante, ne touchant qu'un canton suisse pour le début de février 1689, pendant lequel les chutes de neige furent particulièrement abondantes:

Morts	120
Ensevelis et dégagés vivants	180
Maisons détruites	119
Granges et hangars détruits	629
Bêtes à corne tuées	326
Moutons et chèvres tués	584
Arbres cassés	1 830

C'était une catastrophe exceptionnelle par son envergure, mais des catastrophes de moindre importance ont lieu assez souvent, les petites ayant lieu chaque année dans les Alpes de Suisse, de France et d'Italie.

En U.R.S.S., de nombreuses régions du Caucase ont à souffrir des avalanches. La Route stratégique de Géorgie est chaque année coupée pour plusieurs jours par les avalanches dévalant les hautes montagnes. Dans l'Altaï, dans le Tian-Chan et le Pamir, elles ne sont pas rares non plus, mais étant donné le peu de densité de la population de ces régions, les dégâts ne sont pas importants. Dans la presqu'île de Kola, dans le massif des Khibines, les avalanches commencent à causer des dommages aux habitations et aux ouvriers des mines d'apatites de la ville de Kirovsk; en février 1939, plusieurs bâtiments ont été ensevelis avec leurs habitants. Des constructions de protection contre les avalanches ont été édifiées sur les versants des Khibines.

Dans les montagnes, les amas de neige se forment tous les ans dans certains endroits favorables et sont à l'origine d'avalanches plus ou moins fortes, suivant les quantités de neige tombée, le nombre de jours de chute de neige ininterrompue et les dégels soudains. Les voies que suivent ces avalanches étant connues, la population n'y construit pas de maisons. Les ravages les plus importants sont causés par les avalanches ayant lieu dans des endroits inaccoutumés: elles détruisent des bandes entières de forêts et ensevelissent les édifices au pied des versants. Des alpinistes même expérimentés, qui suivent les pentes surplombées par des amas de neige, périssent quelquefois dans les avalanches.

Les mesures de précaution sont les suivantes. On pratique sur les flancs des montagnes, là où se produisent les avalanches, des

gradins ou bien l'on élève une suite de murs (fig. 257). Les uns et les autres retiennent la neige. Au-dessous de la limite des forêts, les plantations d'arbres sur les versants abrupts jouent le même rôle. On protège les routes par des tunnels. Ainsi, sur la Route stratégique de Géorgie aux points où les avalanches tombent chaque année, la route parcourt des centaines de mètres dans ces tunnels. Les avalanches glaciaires sont relativement rares et se décollent périodiquement de certains glaciers se terminant sur des pentes abruptes. Le glacier Devdorak du Kazbek, dans le Caucase, lors de ses avances périodiques encombrait, de temps en temps, la vallée du Térék et la Route stratégique de Géorgie. La dernière grande avalanche, en 1832, précipita 12,8 millions de mètres cubes de glace

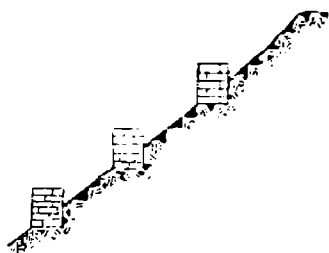


Fig. 257. Murs de protection sur un versant où les avalanches sont fréquentes.

et de pierres à une vitesse de 2,5 kilomètres par minute par la gorge de la rivière Amalichka, dans la vallée du Térék. Lors de son avance, le glacier forme dans la gorge de la rivière Amalichka, dans sa partie étroite, un barrage de glace qui retient l'eau; cette dernière, quand sa poussée devient assez forte, crève le barrage et emporte la masse de glace et de roches.

Le glacier de Saniban a provoqué une catastrophe du même genre en 1902 en barrant par ses décombres la rivière Guénaldon et ensevelissant près de 100 personnes en traitement aux sources thermales de Karmadon; la cause de cette avalanche était un tremblement de terre.

Des catastrophes ayant pour cause le barrage de cours d'eau par la langue d'un glacier lors de son avance ou l'accumulation de l'eau dans les cavernes glaciaires ont eu lieu à maintes reprises dans les Alpes suisses et en Savoie.

Les éruptions de volcans s'accompagnent assez fréquemment de catastrophes plus ou moins importantes qu'un volume entier ne suffirait pas à décrire. Parmi les plus anciennes on connaît la destruction des villes d'Herculanum et de Pompéi en l'an 79 de notre ère, au pied du Vésuve, que l'on croyait alors être un volcan éteint. Son cratère était même envahi par une forêt où se cacha autrefois Spartacus, le célèbre chef d'esclaves révoltés; les versants fertiles étaient couverts de végétation, et des bourgades florissantes

s'étaient au pied de cette montagne. L'éruption s'est produite de façon tout à fait inattendue, sans aucun signe précurseur, s'il faut en croire le témoignage de Pline le Jeune, dont l'oncle, le naturaliste Pline l'Ancien, périt lors de la catastrophe. Cette description est le document le plus ancien de vulcanologie.

L'éruption du Vésuve commença par une terrible explosion, qui fit sauter le bouchon de lave du cratère et le projeta sur les versants sous forme d'une grêle de pierre, puis une énorme masse de ponce blanche fut éjectée qui ensevelit la ville de Pompéi; cette ponce blanche a été suivie d'une ponce plus sombre, puis de scories encore plus sombres et, pendant la phase principale, des quantités colossales de cendres qui cachèrent le soleil aux alentours du Vésuve. De violents tremblements de terre accompagnaient l'éruption dévastant la contrée; des averses tombaient sur les versants du volcan formant avec les cendres des masses épaisses qui s'écoulèrent en torrents de boue et submergèrent la ville d'Herculanum. Vers la fin, probablement, les laves se frayèrent un chemin sous la forme de la coulée de Castello di Cisterna et se déversèrent sur les marais inhabités, dans la partie nord au pied du volcan. Telle fut la catastrophe qui entraîna la mort de 25 000 personnes ensevelies sous les cendres ou noyées dans la boue, comme l'ont montré les fouilles qui ont mis à jour des bâtiments, des rues, des intérieurs entiers et des cadavres dans les rues et dans les maisons, surpris par la mort dans les poses les plus diverses.

Une catastrophe du même genre a eu lieu sous nos yeux en 1902 à la Martinique, une des Petites Antilles, lors de la reprise de l'activité de la montagne Pelée. On la considérait elle aussi comme éteinte, et la population de l'île ignorait tout de son activité, aucune légende n'ayant été conservée à ce sujet. Ses versants étaient couverts de forêts, un lac emplissait le cratère au milieu d'une forêt peuplée d'oiseaux et d'animaux sauvages.

Le volcan commença à donner des signes de vie à la fin d'avril par des tressaillements légers du sol, des émissions par le cratère de fumée et de vapeurs mêlées de cendres et de gaz sulfureux des crevasses qui asphyxia un grand nombre d'oiseaux. Les animaux sauvages commencèrent à quitter les bois, mais les hommes qui habitaient les nombreuses fermes sur les versants et dans la ville de Saint-Pierre au pied du volcan, craignant d'abandonner leurs biens, ne partirent pas. Le 5 mai un torrent de boue détruisit une usine sur le versant; le lac du cratère avait probablement été éjecté sous forme de boue et d'eau par une explosion. Le 7 mai des

cendres abondantes tombèrent de nouveau, ainsi que des bombes incandescentes; de violents orages provoquèrent des torrents de boue. Enfin, au matin du 8 mai, une énorme nuée ardente fut projetée du cratère par une forte explosion et dévala la pente à la vitesse d'un express, gagnant simultanément en hauteur et en largeur et se transformant en une immense colonne de nuages violet-noir épais et tourbillonnants, sillonnés d'éclairs ininterrompus.

Cette colonne atteignit plusieurs milliers de mètres de haut et anéantit tout sur son chemin vers la mer. Quelques minutes après l'explosion il ne restait que des ruines de ce qui avait été la ville de Saint-Pierre, située à huit kilomètres en ligne droite du cratère, et 26 000 hommes avaient péri. La nuée ardente calcina les feuilles et les branches des arbres, les herbes et les buissons, arrachait les toits, renversait les murs des maisons et étouffait les hommes, les asphyxiait et les brûlait de ses gaz incandescents mêlés de cendres. Même à l'écart du chemin suivi par la nuée ardente, dans son voisinage, les hommes suffoquaient, la végétation se desséchait.

Des incendies se déclarèrent sur les vaisseaux se trouvant en rade de Saint-Pierre, où il y eut aussi des victimes. Pendant cette explosion une lave très visqueuse fut projetée vers le ciel sous forme d'une colonne incandescente, qui produisit l'"aiguille" de la montagne Pelée, d'une hauteur de 140 mètres, qui se désagrégea peu à peu (fig. 258). Le volcan resta longtemps en activité et lança plus d'une fois de semblables nuées ardentes, qui prenaient un autre chemin vers la mer — par les vallées des rivières Blanche et Sèche. Des masses importantes de cendres, de bombes petites et grandes et des blocs entiers, gros comme des maisons à un étage, transportés par les nuées ardentes se déposèrent sur ce chemin. Cette terrible catastrophe permit aux savants d'étudier un nouveau type d'éruption, autrefois inconnu, qu'on appela peléen. La carte du nord de la Martinique indique les surfaces dévastées par les nuées ardentes et les chutes de cendres (fig. 259).

L'éruption du volcan Banday-san au Japon, le 15 juillet 1888 avait un autre caractère. A 7 heures du matin, on entendit un grondement souterrain, suivi une demi-heure plus tard de secousses; bientôt une colonne de vapeurs et de poussière s'éleva à une hauteur de 1 300 mètres. Puis 15 ou 20 explosions retentirent, rejetant des masses de roches dures presque horizontalement. La colonne monta jusqu'à 6 000 mètres, les cendres chaudes plongèrent la contrée dans d'épaisses ténèbres, une explosion creusa dans le volcan un cratère de 2 kilomètres de diamètre en forme de fer à cheval,

et dont les débris projetés horizontalement constituèrent une avalanche incandescente, précédée d'un ouragan se déplaçant à une vitesse de 40 mètres à la seconde, qui renversait les arbres et dévêtait les hommes. Une surface de 71 kilomètres carrés fut ense-



Fig. 258. L'aiguille de la montagne Pelée, à la Martinique, lancée à l'état incandescent du cratère du volcan lors de l'éruption de 1902.

velie sous les débris, plus de 400 personnes y trouvèrent la mort. Toute l'éruption ne dura que deux heures, mais les ténèbres se sont maintenues huit heures durant. Ce volcan était resté inactif pendant mille ans, et l'éruption détruisit presque entièrement son ancien cône de 670 mètres de haut.

L'éruption du Krakatoa les 26 et 27 août 1883 dans l'archipel de la Sonde fut une catastrophe exceptionnelle, qui s'accompagnait

de telles explosions et déflagrations qu'elles furent entendues aux Indes, en Australie, en Nouvelle Guinée et aux Philippines, c'est-à-dire à une distance de 3600 à 4800 kilomètres. La déflagration provoquée par la détonation a ébranlé des bâtiments distants de 850 kilomètres. La moitié du volcan, qui était une île située entre Java et Sumatra, s'enfonça partiellement dans la mer, partiellement se transforma en cendres et débris. Les cendres obscurcissaient le ciel au point qu'un navire, surpris dans la mer de Java, fut obligé

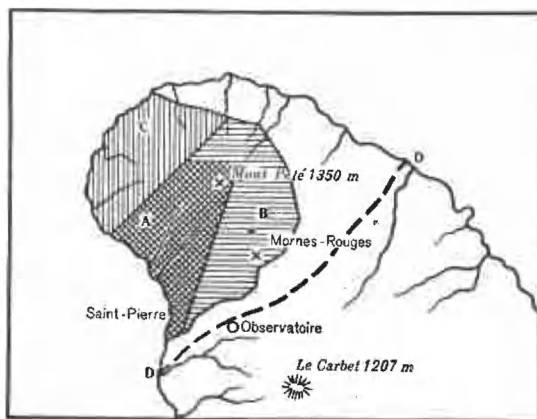


Fig. 259. Carte de la partie nord de la Martinique.

A — territoire ravagé par la nuée ardente du 8 mai 1902; B — extension de ce territoire à la suite de l'éruption du 30 août; C — surface couverte de cendres épaisses; D — limite de la chute des cendres.

d'arrêter sa marche; une pluie de cendres, de boue liquide et de ponce tombait sur le pont; le gaz sulfureux rendait la respiration difficile; des blocs, gros comme la tête, tombaient à 20 kilomètres du volcan et des pierres de la dimension du poing, à 40 kilomètres, projetées par le volcan à la vitesse d'un obus. Mais les dégâts les plus importants furent causés par les vagues soulevées lors de l'immersion du volcan. Elles atteignirent, le long des côtes de Java et de Sumatra, de 20 à 35 mètres de hauteur, inondant les côtes, emportant des villages entiers, et causèrent la mort de 35000 hommes. Ces vagues parvinrent aux Indes, à l'Afrique du Sud et sur les côtes de l'Amérique du Nord, de Panama à l'Alaska. La couche de cendres atteignit 16 mètres d'épaisseur aux abords du Krakatoa, 1 mètre à Sumatra,

et les cendres fines obscurcissaient le soleil au Japon et en d'autres endroits situés à plus de 3 000 kilomètres. Ces cendres, qui flottèrent longtemps dans l'atmosphère, furent à l'origine de la couleur bleuâtre du soleil et de la lune en Afrique, en Amérique et sur les îles du Pacifique, et des magnifiques aurores rouges que l'on pouvait observer vers la fin de 1883 et au début de 1884 sur toute la Terre.

Mentionnons encore l'éruption du volcan Santa-Maria au Guatemala (Amérique Centrale) le 24 octobre 1902 après une période de calme complet. Elle débuta par un tremblement de terre après lequel un nuage de cendres et de pierres fut lancé à une hauteur de 10 000 mètres; ces éjections de cendres et de ponces durèrent 18 heures; les débris tombaient à une distance de 14 kilomètres du volcan. Le 26 octobre, l'éruption prit fin; elle avait donné 5,5 kilomètres cubes de produits meubles qui avaient couvert les abords du volcan d'une couche épaisse de 1 à 3 mètres et plus et anéanti de nombreuses plantations. Sur le versant du volcan s'était formé un nouveau cratère de 600 mètres de profondeur et de 1 kilomètre de diamètre, où de faibles dégagements de vapeurs et de cendres continuaient. A la fin de l'année, il commença à se remplir d'eau. En 1906, des explosions projetaient de temps en temps cette eau à la manière des geysers.

Les éruptions des volcans Banday-san, Krakatoa et Santa-Maria n'ont pas donné de coulée de lave, et en général ce n'est pas la lave, mais les produits meubles et gazeux qui font le plus de victimes, comme l'ont montré également les éruptions du Vésuve en 79 et de la montagne Pelée en 1902.

L'échauffement de l'air, à la suite de l'éruption du volcan Tambora à Java, le 10 avril 1815, a provoqué une trombe gigantesque qui emporta des villages entiers et des forêts, souleva en l'air des arbres, des maisons et des animaux et les fit tourbillonner jusqu'à ce que sa force, une heure plus tard, ne fût sensiblement réduite; une grande quantité d'objets soulevés sont tombés à la mer. Cette éruption causa la mort de plus de 56 000 personnes.

Suivant une statistique très incomplète, les pertes humaines provoquées par les éruptions de 57 volcans depuis l'an 1500 montent à 190 000; 93 % de ce total tombent sur l'hémisphère du Pacifique et 7 % seulement sur l'hémisphère de l'Atlantique, où l'Italie avec la Sicile et l'Islande sont les principales victimes. Les pertes résultant des destructions de bâtiments, de troupeaux, de plantations ne se prêtent à aucun calcul. Les causes principales des catastrophes sont les nuées ardentes, les cendres, les bombes,

les gaz incandescents, les ondes marines et aériennes et les laves en tout dernier lieu. Les éruptions causent aussi des incendies de forêts et de champs ainsi que des épizooties.

Les tremblements de terre, par les conséquences qu'ils entraînent pour les hommes, sont au premier rang des catastrophes dans l'histoire de la Terre. On pourrait également consacrer un volume entier à leur description, mais nous ne pouvons parler que de certains d'entre eux. Lors des catastrophes de ce genre la cause principale des pertes de vies humaines sont les écroulements de maisons et les incendies qui les accompagnent. Les raz de marée jouent aussi un rôle important; ils sont provoqués par les secousses et inondent les côtes; en troisième lieu viennent les éboulements, les glissements de terrain et les effondrements. Les pertes matérielles sont également, pour la majeure partie, dues aux destructions d'immeubles et autres ouvrages; les destructions de récoltes sont relativement peu élevées. Mais les tremblements de terre ont cet avantage que l'on peut éviter en partie leurs funestes conséquences en édifiant des constructions antiséismiques, alors que pour les éruptions la seule mesure raisonnable est de quitter les lieux se trouvant à proximité des volcans dangereux ou suspects; or l'homme se refuse à le faire. Cette mesure n'est d'ailleurs pas radicale, comme le montrent les exemples cités.

100 000 à 200 000 personnes ont trouvé la mort pendant le tremblement de terre qui a ravagé les côtes de la Méditerranée en l'an 526 de notre ère. En 1693, 60 000 hommes ont été tués en Sicile. Le séisme de Lisbonne s'est fait sentir sur une surface quadruple de celle de l'Europe; presque toutes les villes du Portugal furent détruites; Madrid, Séville et Cadix en Espagne eurent également à en souffrir. 32 000 personnes périrent dans les maisons écroulées et 60 000 par suite du raz de marée que provoqua le séisme. La vague atteignait une hauteur de 26 mètres à Lisbonne et entraîna à la mer la multitude de ceux qui avaient cru se sauver en se réfugiant sur la jetée; elle atteignit 20 mètres à Cadix, 5-6 mètres au Maroc et dans l'île de Madère.

83 000 hommes périrent lors du tremblement de terre de Messine en 1908 qui engloba les deux bords du graben entre la Sicile et l'Italie; presque toutes les villes du littoral furent détruites, des fissures se formèrent et des bandes entières de terre (notamment le quai de Messine) s'abîmèrent dans la mer. Les terribles dégâts, causés aux édifices, étaient en grande partie dus à la construction défectueuse, surtout en ce qui concerne les matériaux utilisés:

galets au lieu de briques et glaise au lieu de ciment. Il en fut de même lors du tremblement de terre de 1927 en Crimée. La plupart des bâtiments édifiés avec des matériaux de bonne qualité résistèrent alors que les autres s'écroulèrent (fig. 260). Lors de ce séisme



Fig. 260. Etage supérieur d'une maison détruite. Ialta. Tremblement de terre de 1927.

bien des habitants de la Crimée craignaient que cette dernière ne s'enfonce sous les flots comme il en fut autrefois de l'extrémité sud des monts Tauriques, qui se trouvent actuellement dans les profondeurs du sud de la mer Noire. Mais la détermination de l'épicentre de ce tremblement de terre et de ceux qui suivirent montra qu'il était situé au fond de la mer à trente kilomètres de la côte de la Crimée et se rattachait probablement à la faille,

séparant la partie des terres immergée de celle qui s'est soulevée et forme la presqu'île de Crimée. Les séismes ont montré que des déplacements ont encore lieu de nos jours le long de cette ligne, et le plus probable est que le flanc sud continue à s'abaisser, alors que le flanc nord s'élève. Cette dernière supposition est étayée par le fait que la ligne de base enregistrée par ces stations séismiques s'est trouvée déviée et s'incline vers la mer. C'est pourquoi il est plus probable qu'à l'avenir aussi les tremblements de terre continueront de soulever la Crimée, qui n'est donc pas menacée d'effondrement.

Le tremblement de terre de Verny (Alma-Ata) en 1887 détruisit près de 1500 édifices, mais on ne compta pas plus de 330 morts, y compris les environs de la ville. Cela s'explique par le fait que presque toutes les maisons ne comprenaient qu'un rez-de-chaussée, que les rues étaient larges, les maisons très espacés et la densité de la population faible.

Au Caucase, c'est le pied du versant sud du Grand Caucase aux environs des villes de Chémakha et Noukha et le Petit Caucase dans les limites de l'Arménie qui ont le plus à souffrir des tremblements de terre. A Chémakha en 1902 un tremblement de terre démolit 9500 maisons, en endommagea 4000, fit 86 morts et 60 blessés, 400 têtes de bétail furent perdues. On explique le nombre réduit des victimes par le fait que les maisons étaient pour la plupart sans étage et que le tremblement de terre a eu lieu de jour. Celui qui se produisit la même année à Andijan et Ferghana, durant la nuit, fit beaucoup plus de ravages, tuant 4500 personnes et 7000 animaux.

Sur la côte américaine de l'océan Pacifique, c'est l'Amérique Centrale et l'Amérique du Sud qui sont le plus soumises aux séismes. En 1797, les quatre cinquièmes de la ville de Riobamba furent détruits et 40000 personnes y trouvèrent la mort; la petite ville voisine, Lactacunga, est détruite presque tous les dix ans. En 1812, la ville de Caracas fut détruite en trente secondes; depuis lors il y a dans chaque maison de cette ville un mur de sauvegarde près duquel on dispose tous les objets fragiles; cette face des édifices est tournée vers le nord, les poussées ayant lieu le plus souvent de l'ouest à l'est.

La Nouvelle-Zélande souffre également des séismes. En 1931, une catastrophe ravagea la ville de Napier à l'est de l'île septentrionale; tous les édifices en pierre furent détruits et tous les réservoirs de pétrole prirent feu; l'eau manquait pour éteindre les



Fig. 261. Dégâts importants dans la ville de San-Giovanni.
Tremblement de terre de Messine du 28 décembre 1908.

incendies et le feu faisait rage au centre de la ville sept heures encore après la première secousse. Le quartier du port fut anéanti par la gasoline en flammes, cinq villes furent détruites dans la baie de Hawke, qui brûlèrent tant que durèrent les secousses. Des fissures atteignant 30 mètres de long et des glissements de terrain se produisirent tout le long du littoral sur une étendue de 120 kilomètres; les cours d'eau changèrent d'embouchures, le système de canalisation fut complètement détruit; par endroits, la côte se souleva et la mer recula. Dans la zone du tremblement de terre, des geysers jaillirent, éjectant de l'eau, puis de la boue, qui obstrua le fleuve et provoqua une inondation.

C'est le Japon qui a le plus à souffrir des séismes sur le littoral occidental de l'océan Pacifique. De 1604 à 1914, ils firent 103189 victimes et détruisirent 521000 édifices. Le tremblement de terre le plus destructif fut celui du 1^{er} septembre 1923, qui toucha la côte est de l'île principale de Hondo. La capitale du Japon Tokyo et les grandes villes de Yokohama et Yokosouka furent détruites en deux jours par le séisme et les incendies, 8 villes moins importantes furent également détruites et 11 fortement endommagées. Le nombre global des maisons démolies atteignit 653000, des sinistrés 3060000, des disparus 42000. Les dégâts se montèrent à 10 milliards de yen. A Tokyo, dès la première secousse, 76 in-



Fig. 262. Etablissement de bains à Alma-Ata après le tremblement de terre, début du janvier 1911.

cendies éclatèrent; la destruction des conduites d'eau, les encombrements dans les rues, un vent violent et la vaste superficie atteinte par les flammes rendirent les mesures d'extinction impossibles, par suite de quoi les trois quarts de la ville furent brûlés. Les stocks de pétrole et d'huile lourde à Yokohama étaient en flammes. Le pétrole brûlant se répandit sur l'eau de la baie et mit le feu aux navires et embarcations de bois. Des milliers de personnes périrent dans la fumée et les flammes. Un raz de marée balaya la côte, emportant plus de 500 maisons. 356 secousses furent enregistrés pour les deux premières journées de septembre (fig. 263).

En bref, rien que les sept tremblements de terre les plus importants de 1755 à 1915 causèrent la mort de plus de 300 000 personnes, et 142 000 personnes furent tuées au Japon durant la seule année de 1923. En Chine, d'après les chroniques anciennes, 1 415 000 personnes furent tuées par les tremblements de terre de 1038 à 1850 et près de 200 000 encore en 1920. L'importance de ces chiffres s'explique par le fait que dans la Chine du Nord une grande partie de la population vivait dans les cavernes de loess et y trouva la mort. Cette statistique, très incomplète, permet de constater que les tremblements de terre causent bien plus de victimes et de destructions que les autres catastrophes.

Les catastrophes du passé. Toutes les catastrophes décrites se sont déroulées ou bien sous nos yeux ou bien dans un passé récent,

durant les derniers millénaires. Il est hors de doute qu'elles avaient également lieu dans l'antiquité et que certaines d'entre elles pouvaient atteindre une grande ampleur. On peut classer parmi ces catastrophes la légende biblique se rapportant aux villes de Sodome et Gomorrhe, englouties par la terre, soit-disant en punition des péchés de leurs habitants. Ces villes se trouvaient à l'emplacement que couvre actuellement la mer Morte, or cette dernière, comme le prouve la géologie, emplit le graben ou fosse d'effondrement terminant une grande zone d'affaissements et de dépressions qui commence par la fosse des grands lacs africains et se termine par la dépression de la mer Rouge et la vallée de la mer Morte et du Jourdain. C'est pourquoi il est parfaitement possible que la Bible expose sous une forme erronée un événement réel, ayant eu lieu dans les temps révolus : l'effondrement de deux villes lors d'un tremblement de terre.

Une catastrophe plus grandiose encore détruisit l'Atlantide, comme on appelait un Etat qui se trouvait sur les grandes îles de l'Atlantique à l'ouest de Gibraltar. D'après les deux dialogues de Platon *Timée* et *Critias*, huit mille ans avant Solon, les innombrables armées du roi de l'Atlantide envahirent toute la région de la Méditerranée et seule Athènes put résister avec succès. Mais elle aurait été vaincue, si un terrible tremblement de terre n'avait



Fig. 263. Tremblement de terre au Japon du 1^{er} septembre 1923. Ruines d'une fabrique de textile et des maisons voisines, à Tokyo.

pas détruit l'Atlantide qui fut en une nuit engloutie par l'océan, alors que le raz de marée provoqué par ce séisme ravageait tout le littoral de la Méditerranée. Cette légende est vraisemblable, toutes les îles de l'est de l'Atlantique étant volcaniques et certaines données géologiques et zoologiques plaident en faveur de l'existence d'un grand continent entre l'Amérique et l'Europe.

Une catastrophe semblable présida, probablement, à la formation de la mer Egée, causée par un effondrement qui eut lieu au début du quaternaire et donna accès aux eaux de la Méditerranée vers la mer Noire.

Toutes les catastrophes que nous avons décrites sont les compagnons naturels des séismes, des éruptions volcaniques et autres fléaux de la nature, cependant limitées en étendue. Mais l'histoire de la Terre ne fournit-elle pas des preuves de catastrophes de plus grandes envergures, ayant éprouvé des surfaces plus considérables et ayant pu de ce fait agir plus efficacement sur le développement de la vie organique ?

Nous connaissons déjà les transgressions, c'est-à-dire les invasions de la mer qui empiète sur des territoires souvent importants, nous connaissons les époques glaciaires qui ont couvert de glace des parties encore plus importantes de terre ferme. Ces phénomènes peuvent à juste titre être considérés comme des catastrophes dans l'histoire de la Terre, quoique ne survenant pas subitement et s'étendant sur des dizaines de milliers d'années.

Durant toutes les périodes géologiques eurent lieu des transgressions et des régressions, ou reculs de la mer. Certaines d'entre elles se limitaient à un seul continent, d'autres les touchaient tous, plus ou moins simultanément. Pendant les régressions et les transgressions les conditions de vie sur la terre et dans la mer devaient se modifier ; lors des régressions le climat devenait plus sec, plus continental, et plus humide lors des transgressions, avec des écarts de température moindres. Les transgressions augmentaient sensiblement les régions néritiques de la mer, c'est-à-dire les zones d'une profondeur inférieure à 200 mètres, où se concentre la vie organique la plus variée et la plus abondante. C'est pourquoi les transgressions ouvraient une large voie au développement de la vie organique, pour l'apparition de nouvelles espèces, genres et embranchements. Lors des régressions, par contre, ces régions maritimes se réduisaient sensiblement ; dans les zones émergées, la faune et la flore vivant au fond de la mer périssaient, alors que dans les zones restées submergées, pour les organismes capables

de se déplacer, une lutte acharnée pour l'existence commençait, et tous les êtres incapables de s'accomoder aux nouvelles conditions de vie étaient voués à la disparition.

Les glaciations transformaient également, sur de vastes étendues, les conditions de vie sur la Terre. La glace, envahissant de nouveaux territoires, anéantissait tout ce qui vivait. Le climat de la région bordant la zone de glaciation changeait; il devenait froid et les forêts prenaient la place des steppes pour être à leur tour remplacées par les toundras; les formes végétales et animales aimant la chaleur périssaient ou émigraient vers le sud et étaient remplacées par des êtres adaptés au froid et à l'humidité. Certaines formes disparaissaient, d'autres se modifiaient. Lors des régressions des glaciers, les migrations se faisaient en sens inverse mais des changements s'étaient opérés dans la flore et la faune, une partie des formes anciennes ayant disparu pour céder la place à de nouvelles. Le climat changeait également en dehors des régions envahies par la glace. On estime que pendant les glaciations de la zone tempérée des zones pluviales, c'est-à-dire riches en pluies, apparaissaient au sud de ces régions.

Ainsi donc, nous pouvons considérer les transgressions et les régressions, ainsi que les glaciations, comme des catastrophes. Mais alors on peut dire que toute l'histoire de la Terre étant en somme une suite de transgressions et de régressions, toute l'histoire du globe est une suite de catastrophes. On pourrait répondre à cela: oui et non. Oui, car la seule différence entre ces phénomènes et les autres catastrophes est la durée de ces événements, leur étendue dans le temps, ce qui constitue un indice très conventionnel. Non, parce que durant les intervalles entre les transgressions et les régressions et entre les glaciations, les conditions d'existence restent les mêmes durant un laps de temps assez étendu. En tout cas ces catastrophes à longue échéance ne ressemblent pas à celles qu'imaginait Buffon dans sa *Théorie de la Terre*, à la suite desquelles tous les êtres vivants étaient complètement anéantis à la fin de chaque époque. Ces catastrophes de longue durée entraînaient une extinction progressive de certaines formes, l'apparition d'autres variétés d'êtres vivants ou la transformation de certaines espèces.

La disparition de la flore et de la faune. L'histoire de la vie sur la Terre montre, en effet, que durant des intervalles de temps déterminés certains genres, familles, ordres et même certaines classes d'animaux et de plantes apparaissaient, déployaient une grande

ampleur et diversité de formes, puis disparaissaient plus ou moins rapidement ou diminuaient sensiblement.

Ainsi, par exemple, les archéocyathidés, étranges organismes intermédiaires entre les éponges et les coraux, sont apparus, se sont développés à l'extrême et ont disparu durant la seule période cambrienne. Les ammonites, mollusques céphalopodes à la coquille en spirale, sont apparues durant le paléozoïque, ont atteint une grande variété d'espèces et de genres durant le mésozoïque et ont disparu vers le début du tertiaire. Les reptiles, apparus vers la fin du paléozoïque, ont régné sur terre, dans les eaux et dans les airs pendant le mésozoïque, pour reculer à l'arrière-plan pendant le tertiaire en cédant la place aux mammifères. Ces derniers dominent pendant le miocène et le pliocène et cèdent leur priorité à un de leurs genres, l'homme, qui s'est développé durant la période quaternaire. Les trilobites, crustacés originaux, qui avaient déployé une grande variété de formes dans le cambrien et le silurien et occupaient la première place dans la faune marine, ont dû reculer avec l'apparition des céphalopodes, les fauves les plus redoutables parmi les invertébrés de la mer.

Les cryptogames — fougères, pieds-de-loup, prèles — se sont prodigieusement développés durant le carbonifère grâce au climat humide et chaud ; ils formaient de grandes forêts dans les marécages. Durant le permien, avec son climat sec et plus froid, bien des espèces et des genres ont disparu et ont été remplacés par les gymnospermes, les palmiers et les conifères, fécondés avec l'aide du vent et s'accommodant mieux d'un climat sec. Ils ont régné durant le mésozoïque pour être remplacés durant le tertiaire par les angiospermes, mieux adaptées aux variations de climat.

On pourrait encore citer un grand nombre d'exemples. Le rôle principal dans les variations des formes de vie était dévolu aux changements de climat, liés aux transgressions et régressions marines, aux processus orogéniques et aux époques glaciaires.

Mais outre ces variations lentes de la faune et de la flore, en fonction des variations de climat que l'on ne peut considérer comme catastrophes qu'avec les réserves faites plus haut, nous trouvons dans les annales de l'histoire de la Terre des preuves de catastrophes véritables, anéantissant en un court espace de temps des quantités considérables d'animaux et de plantes. Les restes des uns et des autres forment des couches entières de l'écorce terrestre et peuvent être appelés cimetières de fossiles ou champs de cadavres.

Nous avons déjà mentionné que dans le Parc du Yellowstone (U.S.A.) la gorge de la rivière coupe 15 couches superposées d'arbres fossiles alternant avec des tufs volcaniques. Des arbres séculaires ont repoussé ici quinze fois pour être chaque fois pulvérisés par les éruptions volcaniques. Les couches de houille qui en maints endroits de la Terre alternent avec les couches de grès, d'argiles, de calcaires sont également, au fond, des cimetières d'arbres qui ont vécu plus ou moins longtemps, tant que les conditions étaient favorables à leur croissance, sous forme de forêts, rapidement détruites par suite de la transgression d'un lac ou d'une mer ou le débordement d'un fleuve.

En Amérique du Nord et en Afrique orientale on connaît des cimetières de reptiles du crétacé; les expéditions récentes de l'Institut de Paléontologie de l'Académie des Sciences de l'U.R.S.S. ont découvert en Mongolie, en différents endroits, des concentrations d'ossements de reptiles du crétacé et même des nids avec leurs œufs, en d'autres lieux, des restes de mammifères tertiaires. En Amérique du Sud et en Allemagne, on connaît aussi des cimetières de reptiles et d'amphibies du permien. En U.R.S.S., on trouve des concentrations d'ossements de mammifères tertiaires notamment en Bessarabie, dans la presqu'île de Taman et en Sibérie occidentale, près du lac Tchelkar-Tenghis, dans le bassin de la rivière Tourgaï et près de Pavlodar sur l'Irtych. On a découvert récemment de tels cimetières dans les conglomérats et les sables de la base du tertiaire dans le cours inférieur de la rivière Tchou, dans la chaîne Ketmen près de Tachkent et dans les sables du Kysyl-Koum. Là, les ossements de reptiles du crétacé, les carapaces de tortues et les troncs d'arbres sont fortement endommagés, arrondis, mêlés aux galets et représentent les restes d'un énorme cimetière d'animaux et de plantes de la fin du crétacé, qui existait dans cette région et a été endommagé par les torrents de boue, probablement, au début du tertiaire.

On connaît de longue date le cimetière d'amphibies herbivores et carnassiers et de reptiles du permien et du trias, découvert sur la Dvina du Nord par le professeur Amalitski; les squelettes de ces animaux ont formé toute une galerie, dont une partie est exposée au musée de Paléontologie de l'Académie des Sciences à Moscou. Ce cimetière s'étend de la rivière Ounja, traverse la Dvina du Nord et atteint presque la Kama, et les ossements sont inclus dans une couche de grès mêlé de galets et de sable et épaisse de vingt centimètres à trois mètres, comprise entre deux couches de marnes

multicolores, complètement dépourvues d'ossements. Il est probable qu'une régression marine a créé dans ces régions des conditions favorables au développement prodigieux de ces animaux (marécages étendus et fleuves débordés), après quoi une transgression rapide les a recouverts.

En Californie, près de Los Angeles, au Rancho la Brea, se trouve un gisement d'asphalte fameux par ses ossements de mammifères et d'oiseaux du quaternaire. C'est à l'heure actuelle une cavité profonde résultant de l'extraction de l'asphalte solide; au fond, entre les buissons et les roseaux, on voit des mares d'eau stagnante d'où se dégagent par endroits des gaz combustibles sous forme de grosses bulles; l'eau de couleur brun foncé est sale et sent la naphte. C'est de l'eau de pluie qui s'est accumulée à la surface de la naphte épaisse et visqueuse, de l'asphalte liquide formant le fond du creux. Malheur à la bête qui, attirée par l'eau, posera le pied sur le bord de la flaque ou à l'oiseau qui y cherchera appui: ils s'englueront irrémédiablement. Cet endroit est un énorme piège où, durant des centaines et des milliers d'années, périssaient des mammifères et des oiseaux, dont l'asphalte a conservé les ossements. On a commencé à en découvrir dès le début de l'extraction de l'asphalte solide, mais on les rejetait par centaines, jusqu'au moment où des savants, ayant remarqué que ces os appartenaient à des espèces fossiles de l'époque glaciaire, entreprirent des fouilles régulières. Des milliers de crânes et d'os de tigres machairodus (plus de 3000), ainsi que diverses variétés de loups, des lions, des pumas, des lynx, des martres, des mofettes, des renards, des ours et, parmi les oiseaux rapaces, — des aigles, des griffons ou vautours chauves, des condors, des éperviers, des vautours, des faucons, des chouettes ont été trouvés et ornent à présent les musées des U.S.A. Parmi les herbivores on a trouvé des chameaux, des cerfs, des antilopes, des bisons, des sangliers, des chevaux, des tapirs, des mastodontes, des éléphants, des chauves-souris, des taupes et, parmi les rongeurs, — des mulots, des lapins, des lièvres, des souris.

On peut se représenter la formation de ce gigantesque cimetière de la façon suivante: les herbivores, les rongeurs qui venaient boire ou se trouvaient par hasard sur les bords de ce perfide marais, commençaient à s'enliser; leurs cris d'agonie et les parties des cadavres qui émergeaient encore attiraient les carnassiers et les oiseaux de proie, qui s'engluaient à leur tour et périssaient dès qu'ils se posaient près des cadavres ou touchaient la surface en



Fig. 264. Couche à ossements des collines Carnegie-hill, Nebraska, Etats-Unis.

luttant pour le butin. Il est intéressant de noter que la plupart des cadavres appartiennent à de jeunes animaux, qui étaient probablement moins prudents que les vieux. Le fait que les squelettes sont mélangés et dépareillés s'explique par les émanations de gaz qui mettaient l'asphalte liquide en mouvement et le remuaient sans cesse.

Un cimetière encore plus grand, mais datant du tertiaire, a été découvert dans l'Etat de Nebraska sur les collines Carnegie-hill et University-hill. Dans une couche de 15 à 65 centimètres d'épaisseur tout au plus sont enterrés ici des dizaines de milliers de squelettes de la famille des rhinocerotidés: *diceratherium*, *moropus* et *dinohyus*. Dans la dalle de 1,65 x 2 mètres extraite de cette couche et dont une partie est représentée sur la figure 264, on a trouvé 22 crânes de *diceratherium* et une énorme quantité d'ossements en un mélange chaotique. D'après un calcul préliminaire, on a déjà extrait de la première colline près de 164000 os provenant de 820 squelettes de rhinocéros, parmi lesquels le *diceratherium* domine nettement. Dans une autre colline, voisine de la première, on a trouvé à profusion, dans deux couches, des squelettes de petit chameau antilopoïde. Tous les os sont en excellent état et ne

portent aucune trace des dents des carnassiers ou des rongeurs. Cela prouve que les cadavres ne sont pas demeurés longtemps en surface mais ont été rapidement ensevelis. On ne peut expliquer une telle concentration de restes d'herbivores de mêmes espèces que par une catastrophe ayant exterminé rapidement des troupeaux entiers de ces bêtes. On suppose qu'une terrible sécheresse a astreint ces troupeaux à se grouper en cherchant de l'eau dans le lit desséché d'un cours d'eau, où ils ont tous péri de soif. Des cas d'anéantissement du bétail par suite de la sécheresse, d'après les descriptions de Darwin, ont eu lieu en Argentine en 1827 et en 1830. Mais l'absence des traces de dents sur les os nous permet de supposer que les cadavres ont été promptement ensevelis par les alluvions d'un torrent impétueux provoqué par la terrible averse qui a mis fin à la sécheresse. Les sables englobant la couche d'ossements sont d'origine fluviatile. La supposition que ces animaux ont péri par suite d'une épizootie soudaine a également son bien-fondé.

L'île Bolchoï Liakhovskoï, le plus au sud de l'archipel de la Nouvelle Sibérie, n'est, somme toute, qu'un cimetière de mam-



Fig. 265. Glacier fossile, falaise côtière de l'île Bolchoï Liakhovskoï. Cimetière de mammouths.

mouths. Les dépôts quaternaires contiennent une énorme quantité de défenses de ces animaux, des cadavres entiers sont parfois mis au jour ainsi que les restes d'autres mammifères, qui se sont conservés grâce à la congélation perpétuelle du sol. Sur les falaises côtières baignées par le ressac, les défenses sont dégelées en été et tombent sur la plage, où des chasseurs de défenses venus du continent les ramassaient autrefois chaque année (fig. 265). Cette abondance de restes de gros animaux sur une île de dimensions relativement réduites, qui ne pouvait les nourrir, s'explique par le fait qu'au début du quaternaire la Sibérie continentale s'étendait

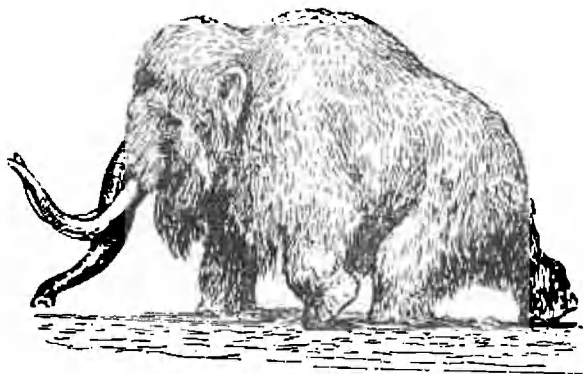


Fig. 266. Mammouth.

bien plus au nord : elle fut dissociée durant la dernière glaciation, et que de grandes surfaces furent englouties par la mer. Les troupeaux de mammouths qui vivaient sur ce continent, se réfugiaient sur les débris de terres restées intactes ; l'île Bolchoï Liakhovskoï était un de ces refuges où s'était concentrée une grande quantité d'animaux. Mais elle était séparée du continent par un large détroit et devint un cimetière de bêtes, car ils furent rapidement décimés par la faim. C'était une véritable catastrophe. Les autres îles contiennent également des ossements mais en quantités bien moindres. L'instinct chassait les animaux vers le sud, vers le continent, c'est pourquoi ils se sont rassemblés en plus grand nombre sur l'île qui se trouvait le plus au sud. La figure 266 représente une reconstruction de mammoth.

Le déluge universel dont parle la Bible se présente comme la seule catastrophe ayant atteint la Terre tout entière du vivant de

l'homme. La géologie n'a pas trouvé de preuves d'un tel déluge dans les couches de l'époque quaternaire qui auraient dû contenir sur un seul et même niveau les restes d'animaux et de plantes. Mais les légendes et traditions de nombreux peuples sur tous les continents mentionnent des faits semblables, ce mythe variant fortement suivant les régions. Ainsi certains peuples nordiques pensent que le déluge a été provoqué par une fonte subite de la neige, les peuplades riveraines parlent, la plupart du temps, de l'inondation de la côte par les flots marins ou de l'immersion de continents.

Cela s'explique par le fait que ce mythe est basé sur un événement réel, une catastrophe ayant pris la forme d'inondation et qui a eu lieu à différentes époques et sous différents aspects et a atteint presque tous les peuples de la Terre. Le géologue autrichien Suess a trouvé que la description biblique de ce mythe est très proche de l'image qu'en donne l'épopée des faits et gestes d'Izdubarre trouvée dans les fragments des annales du prêtre babylonien Bérosee (tablettes cunéiformes). Après l'étude de la description des événements, Suess en est venu à la conclusion que l'immense inondation dans la vallée de l'Euphrate qui a servi de base à la légende biblique, a effectivement eu lieu et a été provoquée par un tremblement de terre dans la région du golfe Persique. Il avait entraîné tout d'abord un recul de la mer, puis un énorme raz de marée, qui, amplifié par un terrible cyclone venu du sud, avait submergé toute la dépression de la Mésopotamie. Mais les annales babyloniennes ne mentionnent pas le déluge universel, elles se contentent de décrire un événement local. Les déluges des autres pays étaient des phénomènes du même genre, qui ont fourni la trame de différents légendes et mythes et leurs causes pouvaient être très diverses : fortes crues après de grandes pluies, fonte subite des neiges, typhons sur les côtes maritimes, raz de marée produits par les séismes ou de fortes éruptions volcaniques (comme celle du Krakatoa en 1883). C'est pourquoi les mythes de divers peuples revêtent un aspect différent ; basés sur des événements réels, ils ont été plus ou moins enjolivés par l'imagination.

XII

QUELLES SONT LES RICHESSES QUE RENFERME LA TERRE

Les minéraux utiles et leurs particularités. Liaison des minéraux utiles et des roches. Formation des roches et des minerais. Gisements endogènes et exogènes, primaires et secondaires. Lois de la répartition des minéraux utiles. La mosaïque de l'écorce terrestre : géosynclinaux, boucliers et socles. Répartition des minéraux utiles sur le territoire de l'U.R.S.S. Les tâches et buts de la géochimie.

L'écorce terrestre renferme diverses matières minérales; indispensables à l'homme civilisé, qu'il faut extraire des différentes couches de la Terre et qui sont appelées minéraux utiles. Même les hommes primitifs ont commencé à se servir de ces minéraux en utilisant les éclats de silex et autres roches dures pour mieux se défendre contre les bêtes sauvages, pour se procurer une nourriture animale et pour lutter entre eux, c'est-à-dire pour la guerre dans sa forme la plus primitive. Avec les progrès de la civilisation, l'utilisation des minéraux devenait plus variée. La technique moderne est impossible sans l'utilisation des minéraux utiles. Seuls une nourriture et des vêtements grossiers, des demeures extrêmement simples: tentes, cabanes, iourtes, peuvent être façonnés à partir de matières premières végétales ou animales sans utilisations de minéraux.

Certains de ces minéraux peuvent être utilisés directement, à l'état brut, comme la houille et la lignite, la tourbe, le sable, l'argile, la pierre meulière. D'autres exigent un traitement simple: nettoyage, taille, tri, concassage, concentration, comme le mica, l'amiante, l'ambre, les phosphorites, le sel gemme, les solutions salées, l'or en paillettes, les pierres de revêtement et les pierres précieuses. D'autres encore exigent un traitement plus ou moins complexe en

usine, permettant d'en extraire les matières directement utilisables : ce sont tous les minerais, autrement dit les combinaisons de métaux avec l'oxygène, le soufre, l'arsenic, etc., ainsi que le pétrole ; ce dernier, d'ailleurs, peut être utilisé brut comme combustible.

Un des traits caractéristiques des minéraux utiles, qui les distinguent des autres forces productrices de la nature, comme les animaux et les plantes, la houille blanche (l'énergie de l'eau), la houille jaune (l'énergie des rayons solaires), la houille bleue (l'énergie du vent), est que leur quantité est limitée et qu'ils ne se renouvellent pas. Les réserves accumulées durant les longues époques de l'histoire de la Terre par les processus naturels, sont limitées et ne se renouvellent pas, tout au moins à une échelle ayant une importance pratique. Cela doit inciter l'homme à les utiliser avec économie, en le poussant d'autre part, vu l'accroissement de la population, le développement de l'industrie et l'épuisement des gisements en exploitation, à en rechercher de nouveaux et à étudier des procédés d'utilisation plus économiques, à exploiter les gisements pauvres et à employer divers substituts.

Lors des recherches de nouveaux gisements, la connaissance des processus géologiques qui ont présidé dans le passé à leur formation (ils s'en forment naturellement aussi à l'heure actuelle, mais en quantités si infimes que l'on ne peut les considérer comme pratiquement utilisables), joue un rôle prépondérant. L'étude des phénomènes géologiques nous permet d'expliquer l'apparition des minéraux utiles, d'orienter, par conséquent, les recherches de nouveaux gisements et d'estimer à leur juste valeur les quantités de minéraux et leur importance pratique.

Les gisements de minéraux utiles sont des concentrations d'un ou de plusieurs minéraux ; ils se constituent donc grâce aux processus qui président à la formation de tous les minéraux, en général. Les gîtes de minéraux utiles sont des cas particuliers de la formation des roches en général, qui sont fonction de certaines conditions particulières. Ces minéraux forment alors des gisements suffisamment importants pour que leur exploitation soit avantageuse. Cette importance dépend essentiellement de la valeur des minéraux et peut être très variable, allant des couches épaisses et des stocks considérables à d'étroites veines et même des inclusions isolées. Seuls les minéraux utiles tels que l'argile plastique, la glaise, le sable et différentes pierres de construction forment des couches ou des successions de couches de roches proprement dites.

Nous savons déjà que les roches se forment de trois façons différentes. Certaines d'entre elles sont le résultat du refroidissement du magma, des masses en fusion qui se trouvent dans les entrailles de la Terre et montent à la surface. Ces roches éruptives sont subdivisées en roches intrusives ou abyssiques qui se sont refroidies à une certaine profondeur, et roches effusives ou laviques ou encore volcaniques qui se sont refroidies à la surface. D'autres roches se forment en tant que dépôts chimiques ou mécaniques dans les bassins d'eau, se dégageant des solutions ou se déposant par décantation et sont appelées roches sédimentaires ou détritiques. Les troisièmes étaient primitivement des roches effusives ou intrusives, d'une part, ou sédimentaires d'autre part, puis ont été modifiées d'une façon ou d'une autre: pression lors de la formation de plissements, refonte ou échauffement violent, injection de gaz ou vapeurs chauds lors de leur descente à de grandes profondeurs ou contact avec le magma des intrusions. Ces roches sont appelées métamorphiques.

Par conséquent, les gisements de minéraux utiles en tant que cas particuliers de la formation des roches, appartiennent à une de ces trois catégories. Ceux qui sont liés à la formation des roches éruptives sont appelés magmatiques ou endogènes, c'est-à-dire engendrés par des processus ayant lieu en profondeur. Ceux qui se sont formés dans les bassins d'eau ou sur la terre ferme par l'érosion sont appelés gisements de dépôt ou d'érosion ou exogènes, autrement dit résultant de phénomènes superficiels. Les gisements formés ou transformés par des processus de métamorphisme sont appelés métamorphiques.

Mais à la source de tous les minéraux constituant l'écorce terrestre et, par conséquent, des gisements de minéraux utiles se trouve le magma. Les roches éruptives contiennent en quantités plus ou moins grandes tous les éléments chimiques connus sur la Terre, comme le prouve leur analyse. Les matières entrant dans la composition des gisements exogènes se trouvaient à l'origine sous une forme ou sous une autre dans les roches éruptives; lors de l'érosion, de celles-ci par l'eau ou par le vent, elles s'en sont dégagées, ont été entraînées dans les solutions ou avec les produits de l'érosion, et se sont concentrées de nouveau en formant des gisements, appelés pour cette raison secondaires ou de remaniement, alors que les gisements produits par les roches éruptives sont seuls, en fait, primaires. Même les roches sédimentaires les plus anciennes sont le résultat de la destruction de la croûte terrestre primitive,

ce qui fait que les gisements les plus anciens de minéraux utiles exogènes sont secondaires. Aux périodes ultérieures de l'histoire de la Terre, les intrusions de magma ont formé de nouveaux gisements primaires, et les processus d'érosion ont transformé ces gisements sédimentaires et les roches primitives, ainsi que les gisements anciens, en nouveaux gisements secondaires. Les roches métamorphiques se constituaient par modification des roches existantes. Ces trois processus ont lieu encore de nos jours.

Passons à présent à un bref examen des processus de formation des gisements de minéraux utiles :

Le magma des entrailles de la Terre contient divers éléments chimiques indispensables pour la minéralisation. Les minéraux commencent à se dégager du magma dès le début de son refroidissement, par cristallisation de la masse fondue. Les combinaisons de métaux lourds, principalement du fer que le magma contient en grandes quantités, forment des accumulations appelées gîtes métallifères. Les processus au cours desquels ils se forment sont appelés différenciation par cristallisation, autrement dit par décomposition du magma.

En d'autres cas, la masse liquide se fractionne en parties de composition différente; certaines contiennent beaucoup de combinaisons de métaux lourds, surtout avec le soufre; ces fractions en se refroidissant donneront également des gîtes métallifères. Ce processus est appelé différenciation par liquation.

Dans les deux cas, des concentrations plus ou moins importantes de minerais — magnétite, chromite, l'ilménite et divers pyrites — prennent naissance dans la roche éruptive même sous forme de gîtes de ségrégation et de liquation. Parfois les masses métallifères en fusion, en mélange avec le magma, pénètrent entre une roche intrusive et les roches encaissantes et forment entre ces roches sédimentaires des gîtes dits d'injection. Ces trois types constituent les gîtes magmatiques proprement dits (fig. 267).

De grandes quantités de gaz et de vapeurs se dégagent du magma en cours de solidification, comme nous le prouvent toutes les éruptions de volcans. Ces dégagements sont appelés émanations. Ils sont formés non seulement de matières gazeuses comme les oxydes de carbone, de soufre, les dérivés du fluor, du chlore et de l'hydrogène, mais de combinaisons de métaux lourds et légers avec le soufre, le chlore, le phosphore, le fluor, etc. Lors des éruptions volcaniques la majeure partie de ces émanations se disperse dans l'atmosphère et se perd, mais une certaine

partie d'entre elles se condense néanmoins dans les fissures et sur les parois du cratère, en formant des dépôts de soufre, d'ammoniaque, de sesquioxyde de fer, de sulfure d'arsenic et autres. Lorsque le magma se solidifie en profondeur sous forme d'intrusions, les émanations se déposent dans les roches environnantes produisant des gîtes, des veines, des filons de minéraux divers.

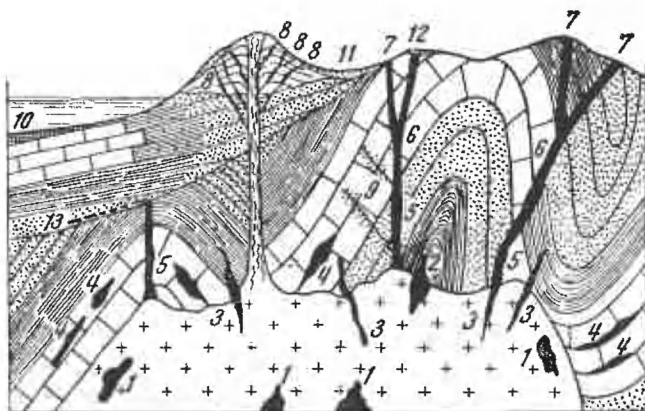


Fig. 267. Coupe schématique montrant l'origine des gîtes métallifères.

1 — gîtes de ségrégation, 2 — gîtes d'injection, 3 — gîtes de pneumatolyse, 4 — gîtes de contact, 5, 6, 7 — gîtes hydrothermaux de grande, moyenne et faible profondeurs, 8 — gîtes volcaniques, 9 — gîtes de substitution, 10 — gîtes sédimentaires contemporains au fond d'une nappe d'eau, 11 — gîtes d'érosion alluvionnaire (de remaniement), 12 — gîtes d'éluvion, 13 — gîte de remaniement ancien.

On distingue parmi ces gîtes d'émanation :

1. Les gîtes de contact se formant dès le début de la solidification et contenant surtout des combinaisons du fer, plus rarement du cuivre, encore plus rarement d'autres métaux.

2. Les gîtes de pneumatolyse, se déposant non seulement à l'extérieur de l'intrusion mais aussi dans ses couches superficielles déjà solidifiées. Ces gîtes sont constitués d'oxydes d'étain, de tungstène, de fer, accompagnés de composés sulfurés du fer, du bismuth, du molybdène et autres.

3. Plus tard encore, quand la solidification se sera étendue aux couches profondes de la masse d'intrusion, les restes de magma en fusion, riches en silice et en composés volatiles, se fraieront

un chemin à travers les fissures et son enveloppe en se solidifiant sous forme de pegmatites. Celles-ci forment des filons irréguliers et contiennent peu de métaux lourds, mais sont en revanche riches en combinaisons d'éléments rares, qui se concentrent dans les restes de magma, dans les profondeurs du foyer. Les pegmatites sont riches en quartz, en feldspaths, en micas, en apatites, en pierres précieuses et autres minéraux rares.

La solidification et le refroidissement du corps intrusif ne prennent pas fin avec la formation des pegmatites. Suivant la profondeur de gisement et les dimensions de ce corps intrusif, le processus peut durer plusieurs millénaires.

Des gaz et de la vapeur d'eau continuent à se dégager des profondeurs du corps intrusif, mais dans l'enveloppe qui s'était refroidie auparavant, ils deviennent liquides et se transforment en solutions contenant des combinaisons de différents éléments, y compris les métaux lourds. Ces solutions s'élèvent en suivant les fentes jusqu'à la surface et déposent le long de leur chemin, au fur et à mesure du refroidissement et de la baisse de pression, des minéraux divers. Elles donnent ainsi naissance à des gîtes dits hydrothermaux et adoptent la forme de veines et de filons de composition et de puissance diverses. On distingue parmi ceux-ci les gîtes profonds contenant surtout des minerais d'or, de cuivre et en partie de fer, d'étain, de tungstène, de molybdène, véhiculés à partir des gîtes pneumatolytiques; les gîtes de moyenne profondeur sont riches en minerais d'argent, de plomb, de zinc et recèlent en quantités moindres des minerais d'or, de fer, de cuivre; les gîtes de faible profondeur sont caractérisés par des minerais de mercure, de la stibine avec des adjonctions d'argent, de plomb, de zinc. La masse principale des filons est constituée par le compagnon des minerais — le quartz, avec, pour les faibles profondeurs, des barytes, des calcites, des dolomites.

Les gîtes d'origine hydrothermale qui se forment lors des éruptions volcaniques occupent une place à part. Quoique dans ce cas les émanations se perdent dans l'atmosphère, le magma qui se trouve dans les profondeurs et alimente le volcan dégage également des gaz et des vapeurs en se refroidissant et donne naissance à des solutions déposant, dans le corps du volcan et sous lui, divers minéraux sous forme de filons. Nous y trouverons les mêmes métaux que dans les filons hydrothermaux d'origine intrusive, mais moins régulièrement répartis en profondeur: l'or avec l'argent et l'étain, le cuivre, le zinc, etc.

Les solutions hydrothermales s'élevant des profondeurs débouchent à la surface sous forme de sources minérales chaudes ou froides que nous connaissons déjà en tant qu'eaux juvéniles. Ces eaux contiennent des gaz : gaz carbonique, sulfure d'hydrogène, ainsi que des composés de métaux légers et lourds ; le rôle principal est ici dévolu aux combinaisons facilement solubles du potassium, du sodium, du calcium, du magnésium — carbonates, sulfates et chlorures, alors que les combinaisons des métaux lourds, moins solubles, se sont déjà déposées au cours du long chemin menant à la surface. Mais en certains cas, les sources chaudes sont tellement chargées de combinaisons des métaux lourds, qu'elles les déposent en surface ; ainsi, les sources chaudes de Californie entraînent et déposent de la cinabre — sulfure de mercure. Ce fait nous explique la formation des filons métallifères.

Examinons à présent les gîtes secondaires ou exogènes. Les agents géologiques détruisent les gîtes primaires qui se sont trouvés, par suite de processus tectoniques et de l'érosion, à la surface de la Terre. Leur matériau minéral se répartit en deux fractions : la partie peu soluble demeure sur place et forme le résidu des gîtes primitifs ou est transportée par la force de l'eau, des vents, des glaciers à une certaine distance et se dépose de nouveau. C'est ainsi que se forment les gisements alluvionnaires de métaux stables et difficilement solubles et de leurs composés : or natif, platine, cassitérites, wolframites, magnétites, ainsi que de minéraux insolubles : diamant, grenat, rubis, émeraude, monazite. Grâce à leur grande stabilité et à leur grande densité, les quantités de ces minéraux et métaux sont souvent plus grandes dans les gîtes secondaires que dans les gîtes primitifs, car les combinaisons plus légères et moins stables ou plus solubles sont entraînées en plus grandes quantités ; c'est un enrichissement chimique et mécanique naturel qui a lieu.

La partie soluble du gisement primaire est entraînée avec les eaux vers les bassins aquatiques — lacs et mers. Si les concentrations sont assez importantes ou si l'action d'animalcules et d'algues élémentaires a eu lieu, les combinaisons des métaux lourds se précipitent et se déposent en formant des gisements de minerais de fer et de manganèse lagunaires, lacustres ou marins, des inclusions de minerais de cuivre dans les grès et les schistes ; dans les lacs et lagunes soumis à une évaporation intense se constituent des gisements de sels de composition diverse. Ces gisements de minerais utiles sont dits gîtes sédimentaires.

Mais ces mêmes fractions dissoutes des gîtes primitifs sont entraînées avec les eaux souterraines, se déposent dans les couches meubles superficielles et s'y concentrent assez souvent, en donnant naissance à des gîtes dont l'exploitation est avantageuse, sous forme de nids, de nodules, de lentilles des minerais de fer et de manganèse, des inclusions de minerais de cuivre, des concrétions de pyrite, des minerais de cobalt et de nickel. Ces gîtes sont appelés gîtes concrétionnés.

Parmi les gisements exogènes, il en est de primaires, mais exclusivement non métalliques, qui sont le résultat de l'activité des plantes et des animaux et sont formés par le carbone extrait du gaz carbonique de l'air par ces derniers. Ce sont les gisements de tourbe, de lignite, de houille et de pétrole se formant dans les marécages tant sur la terre ferme que sur les bords des lacs et des mers et dans les parties peu profondes des eaux côtières. Les processus vitaux, conditionnés par l'énergie solaire, accumulent progressivement des concentrations de matériaux produits par les plantes supérieures et inférieures (tourbe et houilles) et par les algues et les animalcules (naphte).

Les gîtes engendrés par l'activité des animaux supérieurs qui concentrent dans leurs excréments le phosphore de la nourriture qu'ils utilisent, par exemple, les gîtes de phosphorites et de guano, sont également primaires.

On peut adjoindre aux richesses minérales les sources minérales, les sources juvéniles, qui sont des produits d'éruptions au même titre que les divers minerais (pour les effusions comme pour les intrusions), pouvant être considérées comme primaires, alors que les eaux vadoses qui empruntent leur composition minérale aux roches sédimentaires précédemment formées, sont, évidemment, secondaires comme, par exemple, les sources salines.

Des lois qui régissent la répartition des minerais utiles. Ainsi, les gîtes de minerais utiles sont formés grâce à l'activité des forces agissant tant dans les profondeurs de la Terre qu'en surface, c'est-à-dire par les agents géologiques externes et internes. Mais c'est l'activité de ces mêmes forces qui règle la structure et la composition de la surface terrestre ainsi que le relief de la face de la Terre. Par conséquent, des lois générales doivent exister, qui régissent la répartition des minéraux utiles en différentes parties du globe. Il est intéressant et indispensable de connaître ces lois générales pour savoir quels sont les minéraux utiles que nous pourrions trouver

dans les régions de composition et de structure déterminées, ainsi que pour orienter nos recherches de façon rationnelle.

Comme nous le savons, la surface terrestre possède un relief très varié. Les continents présentent l'ensemble de massifs montagneux alpins, de hauts plateaux, de massifs montagneux de hauteur modérée, de surfaces vallonnées et de plaines plates de dimensions très variées. Ces combinaisons de formes sont créées par l'activité conjuguée des forces internes et externes.

Les mouvements de l'écorce terrestre forment des chaînes montagneuses ou de hauts plateaux, élèvent et bombent ou abaissent des compartiments considérables de la Terre. Lors de ces mouvements le magma des profondeurs pénètre dans les épaisseurs de la croûte terrestre et forme des intrusions de différente grandeur et des filons ramifiés qui y sont liés. Il débouche souvent à la surface en produisant des éruptions de volcans, des revêtements et des coulées de lave, des couches de tufs.

Toutes ces aspérités et saillies, produites par les forces internes, sont démantelées, transformées et enfin arasées par les forces externes : érosion des eaux courantes et stagnantes, érosion éolienne et activité des glaciers. Le travail infatigable de ces agents, qui détruit les irrégularités du relief, forme à partir des matériaux ainsi obtenus de nouvelles roches : alluvions diverses sur les continents, couches de sable, d'argile, de vase, de galets, de calcaire dans les lacs et les mers. Nous savons déjà que ce sont ces forces internes et externes qui créent, transforment, détruisent et font renaître sous une forme nouvelle les gîtes de minéraux utiles. L'étude de la composition de l'écorce terrestre et de l'histoire du développement d'une région donnée permet de déterminer les gisements de minéraux utiles qu'elle peut contenir et les lieux probables, ainsi que la façon dont ils sont répartis.

La mosaïque de l'écorce terrestre. Les chaînes montagneuses formées par les roches plissées naissent principalement dans les géosynclinaux, dépressions allongées et plus ou moins larges disposées sur les continents ou en bordure de ceux-ci. Dans ces dépressions dont le fond s'abaisse périodiquement, s'accumulent peu à peu d'énormes épaisseurs de sédiments formés des matériaux apportés par les fleuves et par le ressac de la mer. Quand la dépression est plus ou moins comblée par les sédiments, des plissements prennent naissance dont la cause n'est pas encore élucidée et est l'objet de nombreuses controverses. Mais il est hors de doute que les couches de roches sédimentaires surgissent de ces fosses et forment

des plis plus ou moins compliqués, qui constituent les chaînes montagneuses. En même temps, comme le fond de la dépression, lors de sa flexion, est descendu à une grande profondeur et a atteint les couches de l'écorce terrestre où la température est plus élevée, les sédiments inférieurs ont pu entrer en fusion; le magma, de son côté, a pu, lors des plissements, s'introduire dans les couches sédimentaires sous forme d'intrusions de dimensions diverses, de filons nombreux et même déboucher à la surface engendrant les volcans.

L'étude des chaînes montagneuses a montré que les plissements s'accompagnent habituellement d'intrusions de magma. Or le magma est la source première de tous les minerais, les plissements s'accompagnent de la formation de gîtes métallifères de divers types, depuis les gîtes magmatiques jusqu'aux gîtes hydrothermaux, c'est-à-dire de la formation de gîtes métallifères d'origine endogène.

Quels sont donc les minéraux utiles dont nous pouvons supposer la présence dans un massif montagneux issu d'un géosynclinal? La réponse dépendra de l'âge du massif envisagé. S'il est jeune, il y a lieu de supposer la présence de gîtes hydrothermaux de peu de profondeur, ainsi que de gîtes volcaniques, si les volcans existent. Les autres gisements se trouvent encore à de grandes profondeurs et sont inaccessibles. Si le massif montagneux est un peu plus vieux, les forces externes ont déjà eu le temps de creuser sa surface plus profondément et alors nous pourrions trouver, outre les gîtes déjà cités (qui ont pu être partiellement détruits), des gisements de profondeur moyenne. Enfin, dans les massifs fortement érodés et anciens, on peut trouver près de la surface non seulement des gîtes de grande profondeur, mais aussi des gîtes de pneumatolyse, de contact et des gîtes magmatiques en combinaisons diverses, suivant le degré le démantèlement des roches. En plus de ces gisements endogènes des gîtes exogènes peuvent être décelés dans les massifs d'âge divers: gîtes sédimentaires de fer et de cuivre, couches de houille, phosphorites, si des conditions favorables ont été réunies en différents endroits pour leur permettre de se constituer.

L'histoire de la Terre montre que la formation des chaînes et massifs montagneux de plissement a eu lieu successivement en différents endroits de la plupart des continents, car les géosynclinaux se déplaçaient avec le temps. Les chaînes montagneuses qui s'étaient formées vieillissaient peu à peu, étaient soumises à l'érosion, se transformaient en massifs de hauteur moyenne, puis en contrées vallonnées, et enfin en pénéplaines. Et au voisinage se produisait un nouveau fléchissement de l'écorce terrestre, un nouveau

géosynclinal, qui s'emplissait de sédiments et donnait naissance à une nouvelle chaîne montagneuse qui subissait le même sort.

Ainsi, en Europe, nous voyons au nord les restes des montagnes les plus anciennes de l'archéen et du protérozoïque ou précambrien sous la forme de ce qu'on appelle le bouclier baltique, transformé en pénéplaine. C'est l'Europe la plus ancienne ou Arch-Europe. Elle est bordée à l'ouest par un massif montagneux formé de plissements du cycle calédonien de la première moitié du paléozoïque; il englobe l'ouest de la Scandinavie, la Grande-Bretagne et le nord de la France et de l'Allemagne. C'est la Paléo-Europe. Des plissements montagneux s'étendant du sud de la Pologne jusqu'à la France et l'Espagne datent du cycle hercynien de la deuxième moitié du paléozoïque. C'est la Mésio-Europe. Enfin, au sud, en bordure de la Méditerranée, s'étendent les chaînes montagneuses de l'Asie mineure, du Caucase, des Balkans, des Carpates, des Alpes, des Pyrénées, des Apennins et de l'Atlas, formées durant le cycle alpin du mésozoïque et du cénozoïque et qui constituent la Néo-Europe.

Ainsi les processus orogéniques dans les géosynclinaux progressaient du nord au sud en façonnant peu à peu la face actuelle de l'Europe; l'activité magmatique se déplaçait avec eux et créait les gîtes métallifères; l'activité des agents extérieurs les suivait aussi, creusant de plus en plus profondément les couches des plissements montagneux, détruisant peu à peu les gisements de surface et donnant naissance à des gîtes secondaires à partir des matériaux de cette destruction.

Mais la formation des montagnes ne se limite pas, comme nous le savons, aux seuls géosynclinaux. La pression qui se crée dans l'écorce terrestre et fait saillir, sous forme de plis, les couches de roches des géosynclinaux en tant que zones les plus mobiles de la croûte terrestre, agit également en d'autres endroits, sur les emplacements des anciens géosynclinaux, déjà devenus des massifs montagneux plus ou moins arasés. Ces surfaces sont moins mobiles, plus rigides par suite des plissements anciens et des intrusions de magma sous forme de roches éruptives. De nouveaux plis s'y forment difficilement, les ruptures y dominent ainsi que les fentes; des épaisseurs considérables de couches se déplacent les unes par rapport aux autres, se chevauchent, des coins entiers de l'écorce terrestre font saillie, certains plus, d'autres moins, en formant des horsts et des grabens. Le magma monte aussi par endroits dans les ruptures de l'écorce sous l'action de la pression

interne et produit de nouvelles intrusions dans l'épaisseur des couches, des réseaux de veines ou, débouchant à l'extérieur, fait naître des volcans ou des couches de lave d'épanchement. La constitution des gîtes métallifères primaires est également liée à cette activité magmatique, alors que dans les lacs et les lagunes et à la surface de ces aires rigides se forment des gisements sédimentaires ou d'érosion.

Les surfaces les plus anciennes de la croûte terrestre ayant subi des déformations de plissement dès le précambrien et n'ayant plus été soumises à des plissements intensifs sont appelées plates-formes anciennes. On distingue sur les plates-formes des régions caractérisées par un soulèvement stable et qui n'ont jamais été couvertes par la mer — les boucliers. Mais des parties plus importantes des plates-formes s'affaissaient, se soulevaient et étaient envahies par la mer; elles sont couvertes d'une couche assez puissante de roches sédimentaires qui ne sont pas déformées par des plissements intensifs et s'étendent en strates presque horizontales. Ces compartiments des plates-formes sont nommées tables.

Les plates-formes constituent les parties centrales des continents: en Eurasie, c'est la plate-forme Russe avec les boucliers Baltique et Ukrainien, la plate-forme Sibérienne avec les boucliers d'Anabar et d'Aldan et des saillies du socle ancien à la limite de la plate-forme dans la chaîne de l'Iénisséï, les Saïans orientaux et le plateau du Baïkal, la plate-forme Chinoise (Nord de la Chine) avec de petits boucliers et les boucliers de l'Arabie et de l'Hindoustan. En Amérique du Nord, c'est la plate-forme Nord-Américaine avec le bouclier Canadien; en Amérique du Sud, la plate-forme Sud-Américaine avec le bouclier Brésilien. Presque toute l'Afrique est une plate-forme avec plusieurs boucliers, ainsi que l'Australie avec un grand bouclier à l'est. Presque tout le continent de l'Antarctide est occupé par une plate-forme avec un grand bouclier ancien.

Les boucliers fortement érodés peuvent contenir des gîtes primaires de profondeur maximum: magmatiques proprement dits, d'émanation, et rarement, des gîtes hydrothermaux de grande profondeur. On trouve souvent sur les boucliers des gisements métamorphiques datant du précambrien. Il est tout à fait possible de trouver des gisements secondaires divers, qui se sont formés à la surface du bouclier à partir des produits de destruction des gisements primaires et qui se présentent à l'état de gîtes alluvionnaires ou pépites, ainsi que des minerais de fer lagunaires ou

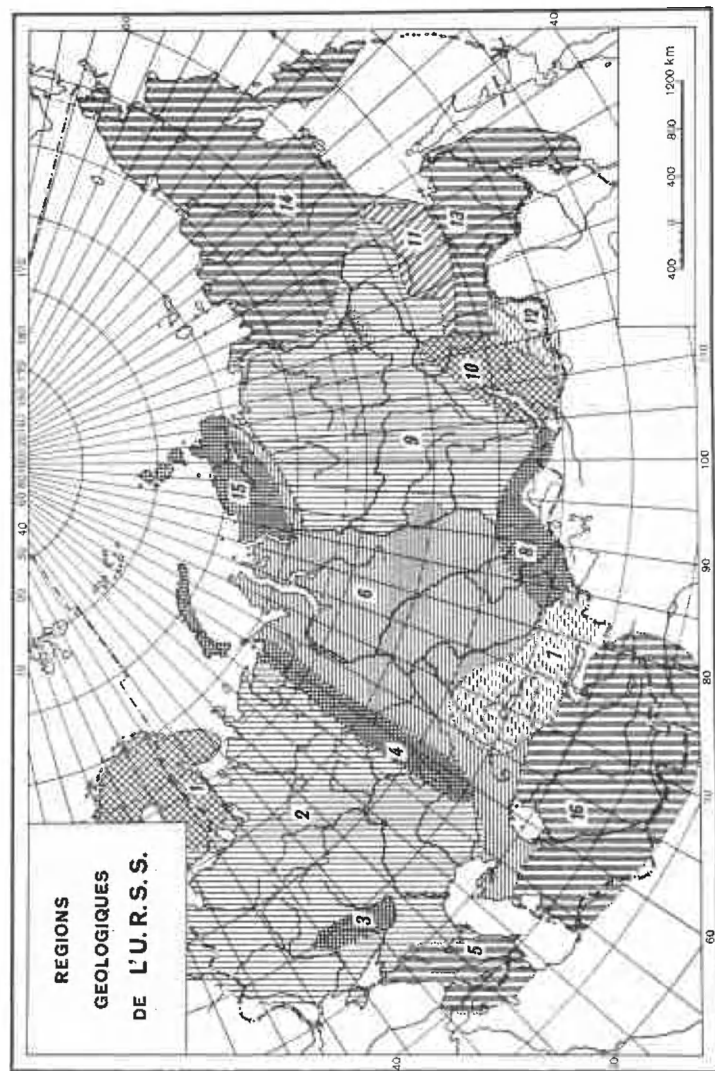


Fig. 268. Régions géologiques de l'U.R.S.S.

1 — bouclier Baltique, 2 — plate-forme Russe, 3 — bassin du Donetz, 4 — Oural, 5 — Caucase, 6 — dépression de la Sibirie occidentale, 7 — collines du Kazakhstan, 8 — région de l'Altai-Saïan, 9 — plate-forme Sibérienne, 10 — plateau du Baïkal, 11 — bouclier de l'Aïda, 12 — Transbaïkalie orientale, 13 — territoire de l'Amour-Oussouri, 14 — région du Nord-Est, 15 — Taimyr, 16 — Asie centrale.

lacustres, de même que des couches de houille dans les sédiments des lacs d'âges divers. Au cas où le bouclier était traversé par les roches d'effusion, celles-ci pouvaient apporter avec elles des minerais utiles de type volcanique.

Les plates-formes dont les socles anciens sont recouverts de sédiments épais d'âges différents, faiblement plissés, peuvent comprendre des gîtes secondaires, provenant des matériaux de destruction des gisements primaires inclus dans le socle ancien. Mais les gisements sédimentaires de houille, de minerais de fer, de phosphorites, de sels divers, de pétrole, formés dans les mers qui avaient submergé la plate-forme, et dans leurs lagunes, ainsi que dans les lacs et sur la terre ferme pendant les régressions et l'assèchement des plates-formes, sont bien plus fréquents. En ce qui concerne les saillies de socles anciens de la plate-forme, les minéraux utiles peuvent y être les mêmes que sur les boucliers.

Nous voyons donc que les continents actuels sont une mosaïque de surfaces diverses à l'histoire géologique différente et, de ce fait, de composition variée. Nous trouvons à côté de boucliers stables des plates-formes qui le sont moins, couvertes de roches sédimentaires d'âge divers en couches presque horizontales, et aussi des géosynclinaux, qui sont les plus instables, transformés en contrées et massifs montagneux dont l'âge et, par conséquent, le degré de destruction varient, et dont la formation est la plus récente et, la plus complexe. La répartition des gisements de minéraux utiles de toutes sortes se trouve en relation directe avec la composition et l'histoire de ces différentes régions de la mosaïque terrestre. C'est pourquoi, connaissant la structure géologique d'un pays donné, nous pourrions dire quels seront les minéraux utiles que peuvent recéler les différentes régions.

Répartitions des minéraux utiles sur le territoire de l'U.R.S.S. L'Union Soviétique, qui occupe un sixième de la terre ferme et s'étend sur deux continents, englobe, naturellement, des régions ayant une histoire et une structure géologiques diverses et, partant, comportant diverses combinaisons de gisements de minéraux utiles. Suivons brièvement la répartition de ceux-ci sur le territoire de l'U.R.S.S. (fig. 268).

Dans la partie européenne, nous verrons au nord, en Carélie et sur la presqu'île de Kola, les extrémités orientale et septentrionale du bouclier Baltique ancien; la plus grande superficie est occupée par la plate-forme Russe, où s'exhausse au sud le massif précambrien de l'Ukraine, qu'il serait plus juste de considérer

non pas comme un bouclier, mais comme une partie du socle ancien, mis à nu par soulèvement et érosion, car il est recouvert par des sédiments marins tertiaires et partiellement mésozoïques et, à son extrémité occidentale, en Volhynie, de sédiments paléozoïques, à plissements faibles et locaux. Il est bordé par le bassin du Donetz, géosynclinal paléozoïque fortement plissé qui était autrefois un véritable massif montagneux. La plate-forme est limitée à l'est par l'Oural, qui est également un géosynclinal paléozoïque dont les chaînes montagneuses sont profondément creusées. Nous voyons à l'extrême sud les montagnes de Crimée et du Caucase, issues définitivement d'un géosynclinal tertiaire au relief alpin. Dans ses lignes principales, la répartition des minéraux utiles sur les surfaces citées est la suivante.

Aux confins du bouclier Baltique fortement érodé, nous ne trouverons que des gisements de roches magmatiques, de pegmatites et d'espèces métamorphiques; les minerais de fer (quartzites ferrugineux et hématites) de formations sédimentaires métamorphisées, les pyrites (pyrrhotines cuivreuses, pyrrhotines de nickel, de zinc, etc.) sous forme de filons de grande profondeur; micas et feldspaths dans les filons de pegmatites, grenats dans les schistes archéens. Dans le massif Khibine près de la ville de Kirovsk, d'énormes gisements d'apatites et divers minéraux rares concordent avec une intrusion paléozoïque plus jeune. Dans les marais et les lacs, on trouve aussi des minerais de fer de formation récente de type érosif, et la schungite de la Carélie qui est une couche de houille métamorphisée très ancienne.

Sur la plate-forme Russe, couverte de roches sédimentaires d'âge divers qui ne furent que faiblement disloquées et ne sont pas traversées par des intrusions, les gisements de minerais de type profond font défaut. De nombreux gisements: houille des bassins de Moscou et de la Pétchora; minerais de fer — gîtes sédimentaires et d'érosion des régions de Kirov, Toulà, Lipetsk et lacustres de la région de Novgorod; pétrole en divers lieux des contreforts de l'Oural, de la Kama à la Basse-Volga, dans la région d'Emben près de la Caspienne et dans les avant-monts du Caucase à Grozny et Maïkop; sel gemme et autres sels à Solikamsk, Bakhmouta, Iletskaïa Zachtchita et ailleurs; bauxites (minerai d'aluminium) à Tikhvine; salines des lacs de la Basse-Volga et du Sivache; phosphorites dans les dépôts d'âge divers. Mais dans le socle précambrien de la plate-forme, dans la région de Koursk, on a découvert d'importants gisements de minerais de fer métamorphi-

ques sous une forte couche de sédiments. Des gîtes du même genre affleurent dans la région de Krivoi-Rog en Ukraine dans les couches précambriennes; dans cette même zone on trouve du mica, du feldspath dans les pegmatites, des gisements de graphite et, dans les sédiments tertiaires, des couches de lignite et des gîtes de minerais de manganèse près de Nikopol.

Le géosynclinal érodé du bassin du Donetz renferme de nombreuses couches de houille dans les strates épaisses des sédiments du carbonifère, et dans les couches crétacées et tertiaires qui les recouvrent, des gisements de craie blanche, de marnes cimentifères et de tripoli. Les filons d'argent et de plomb de la chaîne Nagolni et le gîte de minerai de mercure de Nikitovka sont liés à de rares intrusions.

Le géosynclinal de l'Oural fortement creusé par l'érosion et traversé d'intrusions nombreuses et diverses est riche en gîtes magmatiques, en gîtes de pegmatites, d'émanation et hydrothermaux de grande profondeur; on y rencontre des gîtes d'or et des terrains aurifères et platinifères, des magnétites, des fers titaneux et des chromites, des minerais de tungstène et de nickel, des pyrites et cuivreux, des pegmatites contenant du mica et des émeraudes, des magnésites et de l'amiante. On y trouve également des minerais de fer et d'aluminium d'origine sédimentaire et détritique; sur les versants, où les strates plus récentes affleurent, des couches de houille et des gîtes de minerais de fer et de manganèse sédimentaires.

Les jeunes chaînes montagneuses du Caucase riches en intrusions diverses, comprennent des gîtes hydrothermaux de profondeurs diverses, renferment l'or, le cuivre et l'argent-plomb-zinc, le molybdène, le tungstène ainsi, que des gîtes de contact de minerais de fer. Les gisements de pétrole de Bakou en Azerbaïdjan sont bien connus; en Géorgie occidentale, on trouve des gîtes sédimentaires de houille et de manganèse.

Nous trouvons en Sibérie, à l'ouest, la large vallée de l'Obi constituée de formations sédimentaires récentes, recouvrant des couches anciennes, qui sont probablement disloquées et traversées d'intrusions, mais sont encore inaccessibles et connues seulement par les puits de sondage. Les sédiments superficiels ne contiennent que de la tourbe, des sables et des argiles.

Plus au sud se trouve la partie septentrionale du Kazakhstan — les collines du Kazakhstan; leur structure est très complexe. Il est probable qu'après les cycles précambriens il y avait ici un

géosynclinal paléozoïque, transformé par le cycle calédonien en massif montagneux de plissement, ensuite érodé. Un nouvel affaissement a formé au même endroit un géosynclinal du paléozoïque supérieur, très large mais de peu de profondeur, avec de nombreuses îles, vestiges des montagnes calédoniennes. Le cycle hercynien le transforma en massif montagneux, également érodé; durant l'ère mésozoïque sa surface était couverte de lacs, et au début du tertiaire la mer envahit la steppe. Le cycle alpin a produit des failles et des chevauchements insuffisants pour le transformer en massif montagneux de type imbriqué, à l'exclusion de la partie orientale, où se sont formés les horsts des chaînes Kalbinski, Saour et Tarbagataï. C'est pourquoi l'érosion a eu le temps d'aplanir le relief de la majeure partie de la contrée. Cette ancienne région synclinale, marquée par un grand nombre d'intrusions, possède des gisements de minerais de presque tous les types, du type magmatique au type hydrothermal, de profondeur moyenne: or en filons et terrains aurifères, étain, wolfram, cuivre, argent-plomb-zinc sous forme de filons, minerais de fer métamorphiques et de contact, inclusions de minerais de cuivre de types divers, gisements de corindon, ainsi que couches de houille du carbonifère et du jurassique, sels, gypse, minerais d'aluminium d'érosion.

Le massif montagneux Altaï-Saïan qui borde la steppe à l'est et couvre la Sibérie méridionale jusqu'au Baïkal, est constitué par une série de montagnes imbriquées apparues à l'emplacement de montagnes de plissement plus anciennes, du calédonien et du hercynien pour la partie occidentale, issues des géosynclinaux. Les gîtes endogènes sont abondants et variés: or en filons et terrains aurifères, wolfram, molybdène, cuivre, argent-plomb-zinc en filons, quartzites ferrugineux précambriens, amiante, graphite, néphrite, minerais de fer et de cuivre de contact, pyrites cuivreux, béryllium, minerais d'aluminium et, par endroits, de la houille tertiaire. Les fosses profondes de Kouznetsk et de Minoussinsk, grabens, qui traversent ce massif montagneux, contiennent des houilles du carbonifère, du permien et du jurassique, celles de Minoussinsk aussi du sel, et des minerais de fer et de cuivre dans les affleurements de roches paléozoïques.

La plate-forme Sibérienne se distingue de la plate-forme Russe par l'absence de certains sédiments mésozoïques et sédiments marins tertiaires, par une prépondérance des sédiments paléozoïques anciens et par d'importantes intrusions et épanche-

ments de roches volcaniques les trappes sibériens. Ces derniers sont liés à des gîtes de minerais de fer et de pyrite de cuivre comprenant nickel et platine; des sources salines, le sel gemme et des traces de pétrole sont en relation avec les sédiments marins du paléozoïque ancien, alors que les sédiments lacustres permien et jurassiques s'accompagnent de gisements de houille (et de graphite dans les sédiments permien du bassin de la Tougouska) et de schistes bitumeux dans les sédiments jurassiques des bassins d'Irkoutsk et du Viliouï. Les saillies du socle précambrien qui forment les chaînes de l'Iénisséï et le bouclier d'Anabar contiennent de l'or en filons et en paillettes.

Le plateau du Baïkal, qui comprend la région occidentale transbaïkalienne, les rives du lac Baïkal, le plateau Patome-Vitime, est un massif montagneux de plissement précambrien fortement érodé, traversé d'énormes intrusions anciennes et, vers le sud, d'épanchements plus récents de roches volcaniques dans les fissures de failles, qui ont formé des horsts et des grabens; des lacs jurassiques existaient dans ces derniers. Ses gîtes d'origine ancienne contiennent de l'or en filons et en paillettes, des minerais de fer métamorphiques et de contact, par endroits, des minerais de cuivre, du mica, du feldspath dans les pegmatites. Les sédiments jurassiques et tertiaires renferment de la houille. A l'extrémité sud, où le plateau est bordé par les chaînes plissées du paléozoïque, on a trouvé des minerais de tungstène, d'étain, de molybdène, d'or et d'argent-plomb.

Le bouclier de l'Aldan, qui touche au plateau à l'est, est une pénéplaine à l'endroit de plissements archéens, recouverte par une transgression de la mer cambrienne et les sédiments des lacs jurassiques; le bouclier a été traversé plus tard par de jeunes intrusions et effusions, qui ont engendré des filons d'or; nous trouvons également dans le socle archéen des minerais d'or et de fer et des gisements de mica, de corindon, de piézoquartz et, dans les sédiments jurassiques, des couches de houille.

La Transbaïkalie orientale possède une structure complexe. Après l'arasement des montagnes précambriennes, c'était une suite de géosynclinaux paléozoïques, où se sont formés des plissements calédoniens et hercyniens; une dépression s'y est formée au début du mésozoïque où la mer a pénétré sous forme d'un golfe allongé qui s'est transformé à la fin du jurassique en lacs. Les mouvements du cycle pacifique ont formé de nouvelles montagnes de plissement, constituées de blocs de sédiments pré-



Fig. 269. Terrains aurifères dans la vallée de la rivière Nygri, district de Bodaïbo. Affleurements anciens et talus de terrains aurifères lavés.

cam briens et paléozoïques, de plissements triassiques et jurassiques.

Tous les cycles de plissements s'accompagnaient d'intrusions, et le dernier cycle, d'épanchements superficiels qui se sont prolongés dans le tertiaire et le quaternaire.

Par suite de la complexité de ce processus, les gîtes de minerais sont abondants et très variés. Nous y voyons des gîtes de contact de minerais de fer, des filons de pegmatites et de pneumatolyse contenant du mica, des pierres précieuses, de la fluorine, de l'étain, du wolfram, du molybdène, ainsi que des gîtes hydrothermaux de profondeurs diverses comprenant de l'or, du cuivre, de l'argent, du plomb, du zinc, et même de la stibine et du mercure; les sédiments lacustres du jurassique et du crétacé contiennent du charbon; les gîtes d'érosion sont des terrains aurifères, des gisements de wolfram, d'étain.

L'histoire de la région de l'Amour et du nord-est de la Sibérie est, elle aussi, très compliquée. Le socle de plissement précambrien est souvent recouvert de sédiments marins paléozoïques, mésozoïques, ainsi que tertiaires à la limite est, qui ont subi tous les cycles de plissements accompagnés d'intrusions et d'effusions. C'est pourquoi on y observe des gîtes de minerais

de types et d'âges divers: précambriens, paléozoïques, mésozoïques et tertiaires (or), précambriens (quartzites ferrugineux et graphite); des gîtes de contact de minerais de fer du tertiaire; des gîtes mésozoïques et partiellement tertiaires d'étain, de wolfram, de molybdène, de cuivre, d'argent-plomb-zinc, de stibine; les sédiments continentaux contiennent des gisements de houille mésozoïque et tertiaire; les sédiments du littoral, du pétrole.

L'Asie centrale est formée de deux régions dont l'histoire et les gîtes de minerais sont différents. À l'ouest de l'Amou-Daria s'étendent les plaines de la Turkménie, bordées au sud par les jeunes montagnes du Kopet-Dagh qui sont le prolongement du Caucase, au nord par le plateau Oust-Ourt. Les minéraux utiles y sont le pétrole du Nébit-Dagh (la montagne du Pétrole), le pétrole et l'ozokérite sur la presqu'île de Tchéléken, des gisements de thénardite (sulfate de sodium) dans la vallée du Kopet-Dagh,



Fig. 270. Affleurement dans l'alluvion aurifère de la rivière Nakatami, district de Bodaïbo; *en bas* — couche de gravier fin portant de l'or, *plus haut* — dépôts grossiers de la moraine de fond d'un glacier.

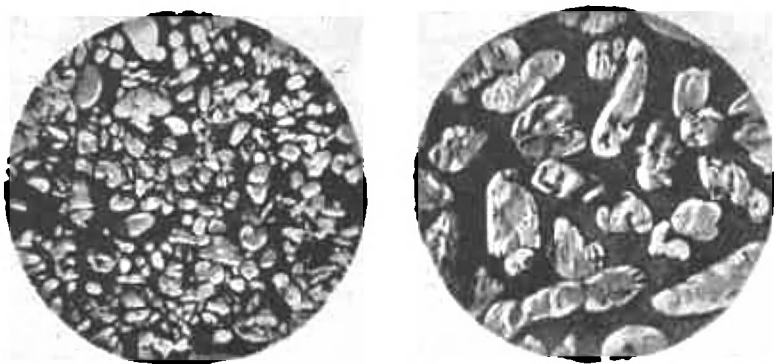


Fig. 271. Or en paillettes et en pépites fines et grosses des terrains aurifères du district de Bodaïbo. Grossi trois fois.

de soufre dans les sables du Kara-Koum, des couches de houille, de phosphorites, des filons de minerais de cuivre dans les montagnes de la presqu'île de Mangychlak. Toutes ces ressources en général, à part les filons, sont d'origine sédimentaire.

A l'est de l'Amou-Daria s'étendent les chaînes montagneuses du Tian-Chan et du Pamir-Alaï, formées par les plissements des cycles calédonien et hercynien et renouvelées pendant le mésozoïque et le cénozoïque. Le Pamir a été soumis à des plissements dans le cycle alpin également. Différentes intrusions d'âge divers ont donné lieu à des gîtes de profondeur, voisinant avec les gîtes sédimentaires et secondaires. Les chaînes montagneuses renferment des gisements d'or, d'étain, de wolfram, de cuivre, d'argent-plomb-zinc, c'est-à-dire des gîtes hydrothermaux de diverse profondeur, ainsi que des gîtes de contact de minerais de fer, des gisements de quartz, de tourmaline avec de la magnétite, du wolfram, du mispickel, des pegmatites contenant du mica et du feldspath. Dans les contreforts montagneux se rencontrent des gîtes sédimentaires de minerais de fer et des gisements de houille. La large dépression de Ferghana recèle des gisements de houille jurassique, de pétrole et, le long du plan de faille, des gîtes hydrothermaux, de peu de profondeur, de stibine et de mercure. Le sel gemme, le soufre, les aluns, les phosphorites, l'amiante, le graphite complètent la variété des ressources minérales de cette région qui ont

été découvertes ou ont été estimées à leur juste valeur grâce aux recherches effectuées après la grande Révolution socialiste d'Octobre.

Les buts et les tâches de la géochimie. Ainsi donc, l'étude de la composition et de la structure géologique d'un pays donné, en élucidant l'histoire de son développement jusqu'à sa physiologie actuelle, nous permet de nous rendre compte des gîtes et gisements de minéraux utiles qui peuvent être découverts dans ses limites. Mais ces données ne nous permettent pas de déterminer les gisements qui doivent obligatoirement se trouver dans les limites de la région étudiée. Pour trancher cette question importante, pour vérifier les pronostics, une étude plus approfondie des processus de formation des minéraux est indispensable. Cette étude constitue la tâche d'une science nouvelle, qui est une branche de la géologie alliant les méthodes de la recherche minéralogique et chimique avec celles de la géologie. Il s'agit de la géochimie.

C'est que les processus de formation des minéraux, se produisant dans l'écorce terrestre à différentes profondeurs et dans des conditions très variées, sont très complexes et ne peuvent que partiellement être reproduits et étudiés en laboratoire. Le magma, qui monte des profondeurs et contient divers éléments, donne naissance à des gîtes de minerais primaires, dont dépend la formation des gîtes secondaires; il peut, dès l'origine, avoir une composition chimique variée. En s'introduisant dans les couches de l'écorce terrestre pour former des corps intrusifs, il fait fondre les roches qu'il touche — calcaire, grès, marnes ou roches éruptives plus anciennes — et doit changer de composition, en s'enrichissant de l'eau imprégnant les roches, ainsi que de silice, d'argile, de chaux, des combinaisons alcalines, suivant la composition des roches traversées. Le processus de différenciation du magma, sa division en magmas de composition diverse, ainsi que les émanations et la composition de ces dernières et, par conséquent, le caractère de la formation des minerais, dépendent de la composition du magma originel de même que de son mode de gisement et de solidification à telle ou telle profondeur. Le caractère des roches adjacentes a son importance, lui aussi, ainsi que leur mode de gisement et leur fissuration. Par exemple, certaines roches, surtout celles qui contiennent de la chaux, se prêtent mieux à la formation de minerais; le caractère du gisement, la dureté, la schistosité, la fissuration facilitent en certains cas et entravent en d'autres

l'apparition des gîtes de minerais et influent également sur leur forme.

C'est pourquoi malgré la similitude existant entre les gîtes de minerais de différents types — magmatique, d'émanation, hydrothermal — nous observons également de grandes divergences locales: prédominance de certains minerais, rareté ou absence d'autres. Ainsi, les gîtes magmatiques proprement dits font parfois défaut, alors qu'en d'autres cas, ce sont les pegmatites ou les gîtes de contact qui manquent. Les pegmatites surtout reflètent la composition du magma qui leur a donné naissance; les roches acides donnent des pegmatites différents de celles que forment les roches basiques, et la minéralisation des unes et des autres n'est pas identique. Certains massifs éruptifs ont donné naissance à des gîtes de minerais pauvres ou uniformes, d'autres, au contraire, donnent des gîtes divers et riches.

Etant donné ces conditions variées que l'on observe dans la nature, une étude approfondie des roches magmatiques, ainsi que celle de la minéralisation de la région donnée, est indispensable pour élucider toutes les conditions nécessaires et réussir ainsi à savoir quels sont les gîtes minéraux qui doivent s'y trouver, compte tenu de l'historique de la région, bien entendu. C'est là la tâche de la géochimie.

Notre bref exposé nous montre la grande variété des richesses minérales réparties sur le territoire de l'U.R.S.S. On y trouve tous les métaux indispensables à l'industrie, ainsi que les minéraux utiles dits non métalliques, comme la houille, le pétrole, la tourbe, divers sels, l'amiante, le graphite, la magnésite et une grande variété de matériaux de construction. Non seulement la diversité de ces richesses est grande, mais aussi leur quantité, autrement dit les réserves assurant le développement de l'industrie pour des dizaines d'années.

Il suffit de dire que l'U.R.S.S. occupe une des premières places dans le monde pour les réserves de minéraux utiles. En ce qui concerne la variété et les réserves de ces ressources, seuls les Etats-Unis d'Amérique et la Grande-Bretagne avec ses colonies et dominions peuvent être placés sur le même rang.

Les richesses de tous les autres pays sont très incomplètes. Par exemple, l'Allemagne possède beaucoup de houille et de sels, mais peu de minerais de fer, de cuivre et autres métaux et n'a presque pas de pétrole. Il y a peu de pétrole, de houille, de minerais de fer au Japon et en Italie. L'Espagne est riche en minerais de

fer, de cuivre et de mercure, mais pauvre en houille et en pétrole. La Suisse, pays de montagnes, est très pauvre en minerais utiles, exception faite des matériaux de construction.

Le manque des minerais les plus importants et de ressources en combustibles est une des causes des guerres d'invasion et colonialiste. L'Espagne a soumis le Mexique et l'Amérique du Sud afin d'y exploiter de riches gisements d'argent, l'Angleterre envahit le Transvaal à cause des terrains aurifères. La lutte pour les minéraux utiles — minerais, houille, pétrole — est un des motifs, et non des moindres, des guerres entre les Etats impérialistes. Durant la deuxième guerre mondiale l'Allemagne et le Japon s'efforcèrent en tout premier lieu d'envahir les pays qui leur fournissaient des matières premières minérales faisant défaut sur leur propre territoire.

XIII

AU JEUNE CHERCHEUR DE TRACES

Ce que nous apprennent les traces sur la neige, sur le sable, sur la boue, sur les pierres. Les traces fossiles : gouttes de pluie, traces de vagues, taupinières, creux de mollusques. Les archives de manuscrits et les archives de la Terre. Exemples d'étude de traces. Etudes des affleurements, du relief et des minéraux utiles. Les fossiles, leur collecte et leur conservation. L'équipement du chercheur de traces. Bibliographie sommaire.

Si vous faites une promenade en ski et avez l'occasion de quitter la ville en allant non pas dans les endroits où des dizaines et des centaines de skieurs ont sillonné la neige, mais un peu plus loin, là où la neige fraîchement tombée est encore vierge, fixez votre attention sur les empreintes laissées par les animaux et essayez d'identifier ceux qui les ont laissées. Apprenez à distinguer les traces des lièvres, celles du renard, du loup, du corbeau, des moineaux et autres menus oiseaux.

Il est facile de distinguer les traces des oiseaux par leurs formes et aussi par le fait que ces traces s'arrêtent brusquement, et qu'à côté des empreintes des pattes l'on voit les sillons que font, de leurs ailes, les oiseaux en s'envolant.

Il est intéressant aussi de suivre les traces sur les sables mouvants, loin des puits où elles ne sont pas effacées par le bétail allant à l'abreuvoir. On peut y trouver des traces de lièvres, de renards, de zisels, de lézards, d'oiseaux divers et même de scarabées et de serpents. En passant quelques heures dissimulés derrière un buisson, pour vérifier nos impressions, nous pourrions voir certains de ceux qui ont laissé leurs empreintes.

Sur le sable humide ou sur la vase des côtes basses des mers ou des lacs, sur l'argile visqueuse des lits que les cours d'eau ont

abandonnés, on peut voir également des traces plus durables que sur la neige ou sur le sable. Ces dernières seront effacées par la prochaine chute de neige ou le vent, alors que les traces sur la glaise sécheront avec celle-ci et dureront jusqu'à l'immersion suivante, qui ne les détruira pas, mais les couvrira d'une nouvelle couche de glaise, autrement dit les rendra fossiles (fig. 272).

Bien des années plus tard, quand la mer reculera ou que les sédiments côtiers actuels seront soulevés, les processus d'érosion marine ou éolienne détruiront la glaise qui couvrirait les traces et quelque chercheur les trouvera et les décrira.



Fig. 272. Traces d'ours sur le sol argileux du versant d'une montagne. Kamtchatka.

Les savants de différents pays ont déjà trouvé des traces fossiles de ce genre et les ont décrites. Ce sont les empreintes de reptiles, grands ou petits, qui erraient sur les bords humides d'un lac ou d'une mer (fig. 273), dont le sol mou enfonçait sous leurs pas, celles provenant de la reptation des vers et des crustacés sur la vase humide du littoral. Elles ont été recouvertes par de nouveaux sédiments lors d'une transgression et se sont conservées.

Et voilà que nous avons appris par hasard qu'il existe non seulement des animaux et des plantes fossiles, mais même les traces éphémères d'un animal qui courait ou du corps

d'un autre qui rampait. Nous ne nous étonnerons plus à présent en apprenant que l'on trouve des empreintes fossiles de gouttes de pluie tombées sur le bord desséché d'un lac ou d'une mer et qui présentent des creux circulaires de diamètre variable, entourés d'un bord provoqué par la chute de la goutte à la surface de la vase ou de l'argile (fig. 274).

Les traces de vagues se conservent également sous forme de rides, c'est-à-dire des irrégularités que crée à la surface d'un fond de sable ou de vase l'agitation légère de l'eau des lacs ou des mers ou le courant d'un fleuve (fig. 275). Ces traces sont constituées par une série de crêtes séparées par des rigoles, des creux légers,

et rappellent les rides que forme le vent à la surface du sable et que nous connaissons déjà (voir chapitre V). On les appelle souvent à tort signes de ressac, autrement dit on les lie aux crêtes que produit la mer en déferlant sur les côtes; ces dernières se rencontrent bien plus rarement et ont des contours différents (fig. 276). En étudiant minutieusement leur forme, celle des crêtes et la taille des grains sur les crêtes et dans les creux, on arrive à déterminer si ces rides ont été formées par le vent sur le continent ou par les vagues sous l'eau, et aussi la direction du courant, des vagues et du vent.



Fig. 273. Traces d'un reptile tridactyle, ayant passé d'une plage vers l'eau, trouvées sur une plaque de grès dans les couches Lily-Pond, Massachusetts, Etats-Unis.

Dans les falaises de la berge d'un cours d'eau ou sur le versant d'un ravin d'où l'on extrait le sable ou la glaise, on peut trouver, sous une couche de terre arable ou *tchernoziom*, dans le sous-sol jaune, des taches grises ou noires, rondes ou de forme irrégulière de diverses dimensions. Ce sont des taupinières fossiles ou terriers d'animaux, qui se sont emplies de matériau; on y trouve les ossements de ces animaux et des restes de leur nourriture. Sur les blocs de certaines roches, surtout des calcaires, au bord de la mer et au-dessus de son niveau actuel, on trouve assez souvent en grande quantité de petites cavités profondes et étranges. Ce sont des orifices creusés par les mollusques bivalves, qui gitaient dans ces trous du temps où l'eau les couvrait encore. On retrouve même des coquilles dans ces cavités. Elles prouvent que la côte s'est élevée ou que la mer a reculé à la suite d'une régression.

Ces traces sont des documents qui nous permettent de juger du passé lointain de notre Terre. Elles sont semblables à ces manuscrits, que l'on conserve dans les archives et qui révèlent

aux historiens les événements des temps révolus, de la vie d'un Etat donné. L'historien n'étudie pas seulement le contenu du manuscrit, mais aussi les caractères, la forme de chaque lettre, qui changeait avec le temps; il examine la couleur et la qualité du papier, la couleur de l'encre ou de l'encre de Chine qui a servi à écrire le document. Les documents plus anciens étaient écrits non pas sur du papier, mais sur du parchemin fait de peau, ou sur du papyrus, fait de tiges de lotus.

Les documents encore plus anciens étaient écrits non pas à l'encre de Chine, mais découpés sur des tablettes de bois ou em-

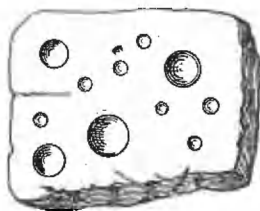


Fig. 274. Empreintes de gouttes de pluie sur une plaque de pierre.

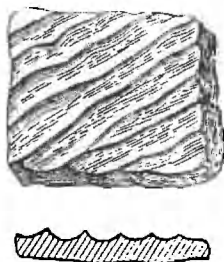


Fig. 275. Traces de vagues sur une plaque de pierre; en bas — coupe de la plaque en travers des crêtes.

preints sur des tablettes d'argile que l'on cuisait. Et les plus anciens de tous, qui datent des temps où l'homme n'avait pas encore inventé de signes pour représenter les mots qui servent à former son langage, mais avait déjà appris à dessiner les animaux, qu'il chassait ou contre lesquels il luttait pour sauvegarder sa vie, sont des dessins exécutés à la peinture rouge ou noire sur les parois des cavernes, sur la surface plane des falaises, ou creusés à l'aide d'un burin (fig. 277). Ces documents sont indispensables à l'historien, à l'archéologue et à l'anthropologue pour jeter de la lumière sur l'histoire de l'homme.

Or les dessins de l'homme préhistorique sont intéressants pour le géologue également, car ils lui donnent une idée des animaux qui vivaient à la même époque. Ainsi, par exemple, l'image du mammoth (fig. 277), malgré toute sa grossièreté, reproduit assez fidèlement la forme générale du corps, la position des défenses

et surtout la toison, qui est un indice des conditions climatiques froides où il vivait. En ce sens, une comparaison entre ce dessin ancien et la reconstitution exécutée de nos jours par les savants qui se sont basés sur les cadavres entiers de ces animaux découverts dans le sol à glaciation perpétuelle du nord de la Sibérie, est instructive (fig. 266).

On étudie également l'histoire de la Terre à l'aide de documents, d'après les traces que nous venons de mentionner et celles, encore plus nombreuses, que laissent tous les phénomènes géologiques lors de leur travail de formation et de transformation de la face

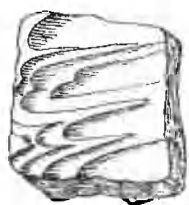


Fig. 276. Traces de ressac sur une plaque de pierre.

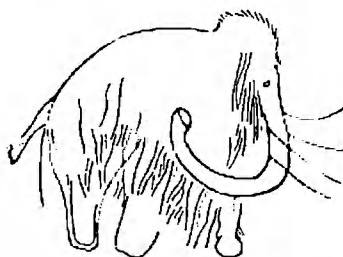


Fig. 277. Dessin représentant un mammoth, exécuté par un homme primitif.

de la Terre. L'ensemble de ces traces représente d'énormes archives géologiques que le savant doit apprendre à lire et à interpréter, tout comme l'historien déchiffre et interprète les manuscrits des archives.

Le géologue suit ces traces pas à pas en les étudiant attentivement, en les comparant, en combinant ses observations, pour en venir en fin de compte à des conclusions déterminées. Le géologue, somme toute, est un chercheur de traces.

L'étude des affleurements. Nous avons décrit, dans les chapitres précédents, différents processus géologiques et leurs résultats, c'est-à-dire les traces qu'ils ont laissées. Citons quelques exemples pour montrer comment il faut interpréter ces documents des archives de la Terre.

En étudiant une vallée de montagnes, encaissée entre des couches de plissement de roches sédimentaires — calcaires, grès, schistes, nous découvrons dans le lit d'un cours d'eau, ainsi que sur les

versants de la vallée, des blocs de granit, roche qui n'apparaît nulle part dans cette vallée. D'où viennent ces pierres ? Nous dirons : ce sont probablement des blocs erratiques, apportés par un glacier qui glissait dans cette vallée d'une vallée voisine. En examinant attentivement la forme de la vallée, nous verrons que sa coupe n'affecte ni la forme d'un V ni celle d'un trapèze, mais adopte



Fig. 278. Stratification oblique dans les grès dévoniens.

celle d'une auge, propre aux vallées suivies par un glacier (voir les figures au chapitre VI). Nous trouverons au fond de la vallée un talus transversal assez confus ou un groupe de collines avec des dépressions fermées entre elles ; dans une coupe nous verrons que le bourrelet transversal ou les collines sont constitués de pierres de diverses dimensions, liées par de la glaise, et que certaines de ces pierres sont polies et striées. Il est clair que c'est une ancienne moraine frontale. Les blocs erratiques, la forme de la vallée, la moraine frontale nous indiquent clairement que nous avons affaire

à une vallée autrefois occupée par un glacier, qui a laissé ces traces. En juxtaposant nos observations, faites en différents endroits de la vallée, nous en viendrons à une conclusion qui éclaircira toute une page nouvelle de l'histoire de cette région, page où l'on nous parle d'une glaciation ancienne.

Nous avons remarqué dans une falaise de la berge d'un cours



Fig. 279. Transgression de sédiments du tertiaire inférieur (collines blanches de l'arrière plan) sur des couches fortement disloquées du carbonifère (rochers gris du premier-plan). Touzdy-Djélan-tchik, dépression de Tourgaï, Kazakhstan.

d'eau une couche épaisse de grès tendre, presque du sable, où les strates n'étaient pas parallèles aux surfaces supérieure et inférieure de la couche, mais étaient inclinés tantôt vers la droite tantôt vers la gauche sous des angles différents. Une telle stratification est appelée schisteuse ou diagonale (fig. 278) et caractérise les sédiments formés dans un milieu où le courant change souvent de direction, par exemple le lit d'un cours d'eau, la côte plate d'un lac ou d'une mer ou les sables mouvants des continents.

De menus indices permettent au géologue de savoir si cette épaisse couche de sable s'est déposée sur la terre ferme, en forme de dunes ou dans l'eau courante ou stagnante.

Nous avons découvert à flanc de ravin ou sur la berge d'un fleuve une falaise à la base de laquelle se trouvent des couches de roches sédimentaires (des schistes, par exemple) fortement inclinées vers la droite (fig. 280). Dans leur partie centrale elles sont comme coupées et couvertes d'une couche de conglomérat, légèrement incliné dans le même sens; nous étudions les galets du conglomérat et remarquons qu'il est formé en partie du même schiste qui constitue les couches sous-jacentes et en partie d'autres roches. Vers le haut de la couche, les quantités de galets décroissent et le conglomérat devient grès. Nous trouvons dans ce dernier des empreintes de végétaux du jurassique et dans les schistes, des coquilles d'ammonites du jurassique inférieur.

Cet affleurement nous a ainsi beaucoup appris: durant le jurassique inférieur (lias), une mer couvrait cette contrée, à en juger par les schistes qui étaient autrefois de la vase fine, se déposant loin des côtes, et par les ammonites qui vivaient au grand large.

Puis de fortes dislocations ont eu lieu; les schistes subirent un plissement et firent partie d'un massif montagneux qui fut par la suite fortement démantelé. Les schistes se trouvèrent couverts par le conglomérat dès la période jurassique.

Mais la suite de l'histoire est confuse: nous n'avons trouvé dans le grès que des empreintes de plantes et il est impossible de dire s'il y a eu ici une transgression marine ou si le conglomérat a été déposé par un fleuve ayant creusé sa vallée dans les montagnes ou au bord d'un lac; on ne sait pas non plus quand cela a eu lieu, car les plantes n'ont permis de définir que l'âge jurassique en général. Les "documents" de cet affleurement sont donc incomplets et pour élucider certaines questions il est indispensable de rechercher d'autres roches mises à nu dans cette contrée. De telles lacunes dans les documents de la Terre sont chose courante et l'on ne les complète que peu à peu lors d'une étude détaillée de la région, par de nombreux chercheurs.

Non seulement la composition des roches sédimentaires, mais aussi leur couleur et la grosseur de leur grain sont des indices précieux pour le chercheur de traces. La couleur rouge indique que le climat de la terre qui a fourni le matériau pour la formation des grès, des marnes et des argiles était chaud, mais assez humide, car il a favorisé la constitution d'un oxyde rouge de fer, à faible hydra-

tation, alors que dans les climats tempérés et humides cet oxyde est jaune et fortement hydraté. La couleur verte dépend le plus souvent des combinaisons de protoxyde de fer et indique qu'il y avait peu d'oxygène au fond du bassin qui a produit ces roches vertes, à la suite de quoi l'oxydation ultérieure du protoxyde n'a pas eu lieu, ou encore que des conditions existaient favorisant la désoxydation de l'oxyde avec transformation de la couleur rouge ou jaune en vert. Les grains extrêmement fins que possèdent les schistes et les argiles pures prouvent qu'ils se sont formés dans la mer, loin du littoral, à partir des troubles très fins, ou sur les continents dans un bassin où seule une vase très fine avait accès. Souvent les couches d'argiles fines alternent avec des couches d'argiles sablonneuses ou de sable argileux; cela prouve que les conditions de transport du matériau changeaient périodiquement. Par exemple, les argiles pures glaciaires alternent avec de fines couches d'argiles sablonneuses: les premières se déposaient en hiver quand la fonte du glacier était réduite et les eaux sous-glaciaires ne véhiculaient que les grains les plus fins, alors qu'en été les pluies abondantes entraînaient également le sable fin. On appelle ces argiles argiles rubannées ou varves, et, en comptant le nombre de leur couches, les savants ont réussi à déterminer pendant combien de millénaires dura le recul du glacier scandinave (voir au chapitre VI).

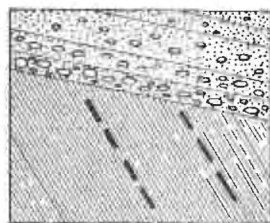


Fig. 280. Conglomérat transgressant sur des schistes plus anciens.

Nous voyons donc que la première tâche du géologue, chercheur de piste, est l'étude des affleurements, c'est-à-dire des roches mises à nu, partout où elles existent dans la région étudiée. Il doit déterminer quelles roches forment cet affleurement, leur mode et leur ordre de gisement, leur composition et leur couleur, si leurs couches sont horizontales ou disloquées, si les failles sont en concordance ou en discordance. Il doit déterminer l'orientation et le pendage des couches, si elles sont modifiées, ainsi que des fissures, si ces dernières forment des systèmes réguliers et coupent toutes les couches.

Si l'affleurement est formé de roches éruptives, les tâches du géologue varient quelque peu. La masse intrusive peut être homogène, il faudra alors mesurer les fissures et la disposition des cristaux, ce

qui permettra de déterminer la direction de la coulée du magma; ou bien l'on pourra y discerner des inclusions de certaines autres roches entraînées lors de l'intrusion ou schliers — concentrations d'un des minéraux entrant dans la composition de la roche (sombres, comme par exemple le mica noir, plus rarement clairs, comme le feldspath ou le quartz).

Dans les roches volcaniques une certaine stratification peut être décelée — alternance des coulées de laves de composition différente et de structure variée, ou alternance de lave et de tufs. Il faut alors déterminer leur mode de gisement.

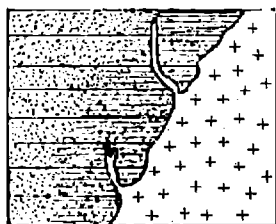


Fig. 281. Contact de granit récent et de grès plus ancien.

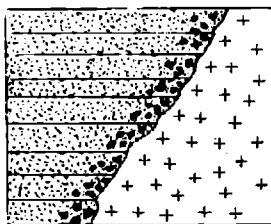


Fig. 282. Contact de granit ancien et de grès plus récent.

(à gauche -- le grès, à droite — le granit)

La présence dans un même affleurement de roches éruptive et sédimentaire complique la tâche du chercheur. Nous avons trouvé par exemple que le granit touche à une couche de roche sédimentaire formée de grès (fig. 281). Une étude minutieuse de la limite des deux roches, de leur contact nous montrera que le grès en bordure du granit n'est plus à l'état pur, mais modifié, métamorphosé et que par endroits des fines veines partant du granit pénétrèrent le grès. Cela suffira pour établir que le granit est plus jeune que le grès; les fossiles du grès aideront à définir l'âge du granit; ainsi, s'ils sont du dévonien supérieur, le granit sera postérieur au dévonien.

Dans un autre affleurement de la même région nous trouverons le même granit en contact avec une couche de grès semblable, de prime abord, à celle que nous venons d'examiner (fig. 282); mais l'étude du contact montrera que les veines de granit dans le grès font défaut et que le grès n'est pas modifié, mais contient, en bordure du contact, des débris et des grains isolés de granit. Cela

prouve que le granit est plus ancien : non seulement il était déjà solidifié, mais avait été déjà mis à nu, et le grès se déposa sur sa surface érodée (fig. 283).

Si nous trouvons dans le grès des fossiles du permien inférieur, par exemple, nous en tirerons la conclusion que le granit est antérieur au permien, et grâce à la présence des affleurements nous pourrions établir que l'intrusion de granit s'est formée pendant le car-



Fig. 283. Couches de grès jurassique sur un granit plus ancien. Kok-Tal près du versant nord de la chaîne Djaïr, Dzoungarie.

bonifère, plutôt vers le début que vers la fin, un certain temps étant nécessaire pour l'érosion d'une intrusion.

Etude du relief. La seconde tâche du géologue, que celui-ci remplit parallèlement à la première, est l'étude du relief de la région car pour avoir une idée suffisamment nette de son histoire il est indispensable de connaître sa liaison avec la composition et la structure de l'écorce terrestre. Il faut déterminer si elle fait partie d'un massif montagneux, d'un plateau ou d'une plaine, ou d'une combinaison de ces formes ; si le massif montagneux possède un relief accidenté, alpin, ou des formes plus arrondies et régulières le classant parmi les montagnes de hauteur moyenne, ou encore des coteaux arrondis ou des chaînes ou groupes de collines. Les formes des cimes, le caractère des versants des vallées fluviales, leur largeur, la présence ou l'absence de terrasses fluviales, les particularités du lit

et du cours des rivières, etc., permettent de définir le stade d'érosion où se trouve la région étudiée. L'âge, la composition et le mode de gisement des roches mises à nu, en combinaison avec le relief, nous aideront à déterminer de façon plus ou moins précise l'histoire géologique de la région envisagée, suivant que les affleurements seront plus ou moins prononcés, que les recherches seront effectuées avec plus ou moins de minutie et que l'expérience et l'ardeur du chercheur seront plus ou moins grandes.

Prenons à titre d'exemple une pénéplaine, stade de la décrépitude du cycle d'érosion. On y voit par endroits des collines plates, dites buttes-témoins de recouvrement ou klippen; on peut trouver ailleurs des tas de pierres dures, de-ci de-là nous voyons entre les herbes un affleurement poli de granit ou encore ses éclats; dans un petit ravin nous verrons des couches de calcaire, de grès ou de schiste mises à nu. Le chercheur de traces étudiera tous ces documents de peu d'importance à première vue, mesurera les strates, en définira l'orientation, le pendage, déterminera leur composition, y trouvera des fossiles, définira l'âge des couches et la succession des événements passés, portera le résultat de ses observations sur la carte de la région et contera à son compagnon, qui l'aide dans son travail mais n'est pas un savant, toute l'histoire de cette contrée: il décrira les montagnes qui s'élevaient jadis sur l'emplacement de cette plaine, lui dira de quelles roches elles étaient composées, dans quelle direction s'étendaient les plis des montagnes, s'il y avait des volcans ou des massifs d'intrusion, quand ces montagnes s'étaient formées et quand elles avaient été détruites. En étudiant les vestiges des événements passés, le chercheur de traces devine l'histoire de la région dont son compagnon a foulé le sol pendant de nombreuses années sans savoir qu'il piétinait les restes de montagnes alpines, passait sans s'en douter à travers d'anciennes crêtes élevées et s'asseyait tranquillement sur l'herbe à l'endroit où autrefois bouillonnait la lave en fusion d'un volcan.

La troisième tâche du chercheur de traces est la recherche et l'étude des minéraux utiles de toute sorte pouvant être trouvés parmi les roches de la région étudiée. Il doit définir leur qualité, leur mode de gisement, et déterminer à l'aide de ces données si le gîte découvert peut être l'objet d'investigations préliminaires, sans lesquelles il est souvent impossible de savoir si les quantités de minéral utile ont une importance pratique. Quand les affleurements sont assez fréquents on peut déterminer en gros les quantités probables de minéral utile d'après les observations faites sur le

terrain et d'après l'étude et l'analyse en laboratoire des échantillons prélevés; l'analyse déterminera la teneur en minerai ou autres minéraux dans la veine, le gisement ou la roche envisagée. Lorsque les affleurements sont insuffisants, des investigations plus poussées sont indispensables — puits de forage et de sondage, creusement de fosses et de tranchées plus ou moins profondes sur les versants ou dans la plaine. Ce sont là les tâches des recherches préliminaires auxquelles on a commencé à appliquer ces dernières années, grâce à l'invention d'instruments très précis, les méthodes de la géophysique, basées sur la détermination du magnétisme, de la conductibilité électrique, de la force de la pesanteur et de la propagation des trains d'ondes sismiques provoqués par des explosions, dans les roches et les minéraux utiles divers.

Lors de la recherche des minéraux utiles il faut fixer son attention sur les vestiges des travaux miniers anciens: creux en entonnoir, mines comblées et puits détruits, amas de mâchefers anciens et de vestiges de fonderie, etc.; on peut trouver près de ces mines d'un passé des gisements d'où l'on extrayait le minerai aux époques très anciennes.

Les fossiles, leur collecte et leur conservation. Nous savons déjà que les restes ensevelis dans les couches de roches sédimentaires des plantes et des animaux qui vivaient autrefois ont une grande importance pour la détermination de l'âge relatif des couches qui les contiennent. Ils indiquent non seulement l'âge, mais aussi le milieu où vivaient les organismes donnés. Ainsi, les restes d'algues indiquent que les roches se déposaient dans l'eau, les vestiges de plantes terrestres disent que le dépôt avait lieu dans les lacs, les marais ou la mer, mais non loin des côtes (si les couches qui les renferment alternent avec d'autres, contenant des organismes marins).

Les ossements des mammifères terrestres peuvent être trouvés dans les dépôts continentaux et lacustres. Les mollusques à coquilles épaisses vivent dans les mers peu profondes, où les mouvements de surface atteignent le fond; les coquillages plus fins, dans les profondeurs plus grandes. Les coraux fossiles révèlent que l'eau de mer était chaude, certains mollusques sont des indices de sa basse température. Les dents de requins ne se rencontrent que dans les sédiments marins; les cuirasses des poissons du paléozoïque, dans les dépôts des embouchures des fleuves, des lagunes, des mers peu profondes. Les empreintes d'insectes ne se trouvent que dans les dépôts continentaux.

Les sédiments marins, surtout ceux provenant de faibles profondeurs, sont plus riches en fossiles que les sédiments continentaux, et leur faune est plus variée; on y trouve à foison éponges, coraux, lys marins, étoiles de mer, oursins, mollusques divers, brachiopodes, crustacés. Dans les sédiments de grande profondeur on n'observe que des organismes élémentaires des foraminifères, des radiolaires et des diatomées.

On rencontre plus fréquemment dans les dépôts continentaux des restes de plantes que des restes d'animaux; mais ces derniers abondent parfois, et les os des vertébrés forment des couches entières comme, par exemple, dans les dépôts permien de la Dvina du Nord, le trias de la région de Kirov, les dépôts du crétacé et du tertiaire de l'Amérique du Nord, de la Mongolie, du Kazakhstan.

Parmi les roches sédimentaires, ce sont les marnes, les calcaires bitumeux et argileux, les sables calcaires et glauconifères, et souvent aussi les grès et les schistes argileux qui contiennent le plus de fossiles. Les quartzites et les grès sablonneux sont en général très pauvres en restes organiques; les conglomérats ne peuvent contenir que des restes importants et durs, capables de supporter le frottement des galets dans la zone du ressac ou dans les lits des cours d'eau, comme, par exemple, les dents et les os des vertébrés, les grosses coquilles de mollusques, les troncs de plantes. Les débris organiques, surtout ceux des animaux, sont souvent la cause de la formation de concrétions, c'est-à-dire de concentrations calcaires enveloppant entièrement le fossile, que l'on découvre en brisant la concrétion. On trouve dans ces dernières des ammonites et autres mollusques, des poissons, des os de vertébrés et même des squelettes entiers, que la concrétion englobait peu à peu. C'est pourquoi il est indispensable de briser les concrétions des roches sédimentaires, pour voir si elles ne renferment pas de fossiles. Il n'y a évidemment pas de restes organiques dans les roches intrusives, ils sont extrêmement rares dans les roches volcaniques, mais on rencontre quelquefois de très bonnes empreintes, de plantes surtout, dans les tufs, en particulier dans les tufs à grains fins et à couches nettement séparées.

On observe, dans les roches, des fossiles isolés, ou des couches qui en contiennent un grand nombre, ou même qui ne sont constituées que par des fossiles. De telles roches sont formées, par exemple, de coraux, d'algues, de brachiopodes, de mollusques, d'os et de débris d'os; les coraux forment des récifs fossiles, les algues — des couches épaisses, les coquillages — des bancs de coquilles. Les plantes lais-

sent le plus souvent des empreintes dans une mince couche de roche, qui peut posséder un grand nombre de ces traces sur toute sa surface. Les couches de houille sont entièrement constituées de matériel végétal, mais il est transformé en masse compacte, et les formes isolées (feuilles, tiges) sont rarement discernables; en revanche, la voûte ou le mur de la couche contiennent souvent de très belles empreintes.

Les restes d'invertébrés sont les parties dures de leurs corps: coquilles des mollusques et des brachiopodes, tiges et doigts des lys marins, carapaces et aiguilles des oursins, carapaces des foraminifères et des crustacés; le matériel d'origine est remplacé par le carbonate de chaux, plus rarement par la silice, parfois par la pyrite, qui envahissent également les emplacements qu'occupaient les parties molles du corps.

Les restes de vertébrés sont des os isolés ou des squelettes entiers; on trouve également des cuirasses de poissons, de reptiles, leurs dents, leurs aiguilles, les cornes et les dents des mammifères. Ce n'est que dans des cas exceptionnels, dans le sol constamment gelé de la Sibérie ou dans l'asphalte, que se conservent les parties molles du corps, les entrailles et la peau.

De telles trouvailles ont une très grande importance scientifique. Elles ont permis de reconstituer avec exactitude l'aspect extérieur du rhinocéros fossile et du mammoth, alors que de nombreuses reconstitutions d'autres animaux supérieurs, effectuées par divers savants, sont bien moins sûres; elles sont exécutées à partir de squelettes, souvent très incomplets, les données concernant le caractère et la couleur de la peau faisant défaut.

On réussit, le plus souvent, à trouver les restes d'animaux sur la face aérée des roches, dans les affleurements et les éboulis au pied de ces dernières, car ils ont une autre composition et sont parfois plus durs que les roches qui les entourent, ce qui fait qu'ils font un peu saillie lors de l'érosion et sont libérés lors de la destruction de la roche. C'est pourquoi le géologue doit avant tout examiner attentivement les menus produits de l'érosion dans les éboulis, les roches détruites, les blocs de roches se trouvant au pied des affleurements et la surface des affleurements mêmes. Si la roche contient des fossiles, ces derniers seront presque toujours décelés lors de cet examen. Seulement, il ne faut pas confondre les fossiles recueillis dans les éboulis et les débris de roches et ceux que l'on trouve dans les affleurements mêmes, car ils peuvent être issus de divers points de cet affleurement. Chaque affleurement reçoit lors

des recherches géologiques son propre numéro d'ordre dans les descriptions et sur la carte; les couches de roches différentes qui le constituent sont désignées par des lettres qui suivent le numéro d'ordre de l'affleurement. C'est pourquoi les fossiles recueillis dans l'affleurement auront un numéro et une lettre correspondant à la couche où ils ont été trouvés, tandis que ceux recueillis dans un éboulis n'auront qu'un numéro.

Un galet dans le lit d'un ruisseau ou d'une rivière est souvent un fossile roulé et poli par l'eau et sert de repère pour les recherches d'affleurements en amont de la rivière.

On dégage les restes organiques décelés dans les roches à l'aide d'un marteau et d'un burin, en s'efforçant de détacher un gros morceau contenant le fossile; on le brise ensuite avec précaution, couche par couche, ou sur les coins si la roche n'est pas stratifiée. Il ne faut évidemment pas frapper avec le marteau sur le fossile. Si un morceau renferme de nombreux restes, il vaut mieux l'emporter avec soi pour le dépecer tranquillement à temps perdu. Dans les roches tendres on dégage le fossile avec précaution à l'aide du burin en même temps que la roche qui l'englobe. Lors de la collecte, on ne doit pas mêler les fossiles provenant de différentes couches d'un même affleurement, et d'autant moins ceux provenant d'affleurements différents. Il ne faut pas se fier à sa mémoire; chaque échantillon doit recevoir immédiatement son numéro d'ordre et sa lettre, que l'on inscrit avec un crayon à copier sur l'échantillon même ou sur une étiquette, et doit être enveloppé dans du papier.

Les empreintes végétales sur la surface des couches de schistes ou de grès sont formées pour la plupart d'une mince couche de charbon, qui s'effrite facilement. C'est pourquoi lors du transport il est indispensable de les envelopper tout d'abord dans une couche d'ouate, et ensuite dans du papier. On enveloppe également dans du coton les coquilles fragiles, les os menus, les empreintes d'insectes, etc. Il faut mieux mettre les coquilles fines et autres restes dans des boîtes d'allumettes ou de conserves, entre deux couches d'ouate avec l'étiquette portant le numéro de l'affleurement et de la couche. Les fossiles enveloppés dans du papier sont emportés à la maison ou au campement dans un sac de montagne, un havresac ou une musette (ou encore dans un simple sac ou une corbeille), puis sont examinés, munis d'étiquettes mentionnant avec précision le lieu de la collecte; on les conserve dans des boîtes. Pour ne pas confondre les échantillons lors des examens et des comparaisons, il faut inscrire sur chaque échantillon son numéro au crayon à copier ou à l'encre

de Chine. Pour expédier les échantillons par la poste on les met serrés dans une boîte, enveloppés d'ouate et de papier.

Il faut placer les concrétions que l'on soupçonne contenir des fossiles, dans un feu de camp assez petit sans les chauffer outre mesure, on les met ensuite dans l'eau ou les arrose; les concrétions s'effritent alors en morceaux et se fissurent le long de la limite du fossile en libérant ce dernier. Les os des vertébrés sont souvent inclus dans des concrétions de dimensions énormes ne pouvant être extraites que lors de fouilles spéciales et par des hommes expérimentés. C'est pourquoi en cas de découverte de telles concrétions, le chercheur de traces se contente de marquer sur la carte et dans son calepin l'emplacement exact de leur gisement et le fait connaître à l'Académie des Sciences ou à l'Université qui pourront organiser des fouilles. Parfois ces os sont englobés dans l'argile, le sable argileux, le sable ou le grès, mais sont dans un état de décomposition tel qu'ils tombent en poussière dès qu'on tente de les dégager; un chercheur inexpérimenté doit se garder de les dégager lui-même, il doit simplement noter et marquer l'emplacement sur la carte et le faire savoir à qui de droit, car la collecte de fossiles de ce genre exige un appareillage spécial et une certaine expérience (fig. 284).

L'équipement du chercheur de traces. Nous ne décrivons par ici l'équipement d'un géologue professionnel partant en expédition; on consultera pour cela les manuels spécialisés. Nous voulons seulement indiquer quel doit être l'équipement du géologue amateur désirant faire connaissance avec les procédés d'exploitation et avec la géologie des environs de l'endroit où il vit.

Cet équipement consiste en un marteau, un burin ou ciseau, une boussole, un calepin, une loupe, un sac ou un filet et une petite réserve de papier d'emballage et de coton ou d'ouate.

Le marteau (autant que possible) est un marteau de géologue dont une des extrémités de la tête est plate et l'autre est taillée en biseau, perpendiculairement au manche, ou en pyramide comme un pic de mineur; le deuxième modèle est plus commode pour travailler dans la roche tendre, le premier pour les roches dures. La dimension du marteau doit être moyenne, la tête doit peser environ 500 grammes. Si le marteau de géologue fait défaut, on peut emporter un petit marteau de forgeron ou de tapissier; mais pour travailler la roche dure il faut qu'il soit suffisamment trempé, sans quoi il s'aplatira rapidement au choc et sera bientôt hors d'usage.

Le burin est une pièce d'acier à section ronde ou rectangulaire, dont un bout est taillé en forme de tranchant; un burin de fer doit avoir un tranchant d'acier. La longueur du burin est de 12 à 15 centimètres; son poids, de 250 à 500 grammes. Le burin est nécessaire pour l'extraction des fossiles et les prélèvements d'échantil-

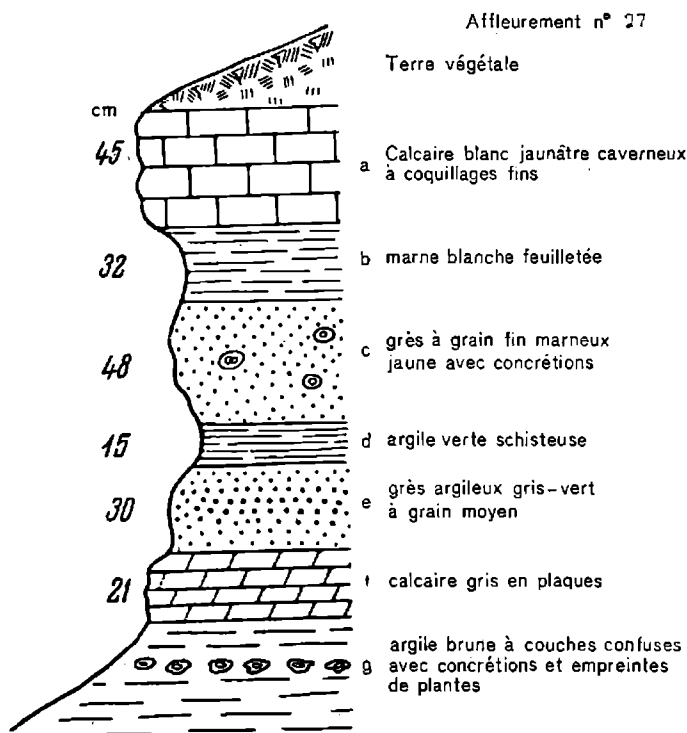


Fig. 284. Exemple de croquis et de notation d'un affleurement de roches dans le calepin d'un géologue.

lons de roches; pour s'en servir, on introduit son tranchant dans les interstices des roches et on frappe sur le bout arrondi.

La boussole géologique ne se distingue de la boussole ordinaire que par son boîtier portant le limbe et l'aiguille aimantée, et qui est fixé sur une tablette de laiton ou d'aluminium carrée ou rectangulaire; les signes E et O, ou O et W, c'est-à-dire Est et Ouest, sont intervertis. Les graduations de 0 à 360° vont en sens inverse des aiguilles d'une montre. De plus, un éclimètre est fixé

sur l'axe de l'aiguille et le limbe porte de part et d'autre du signe O ou W des graduations supplémentaires allant de 0 à 90°, pour la détermination du pendage des couches. En achetant la boussole il faut s'assurer que l'aiguille soit munie d'un cran d'arrêt qui doit la serrer contre la glace lorsque la boussole n'est pas utilisée, puis vérifier que l'aiguille oscille librement, l'amplitude des oscillations se réduisant progressivement. Le boîtier de la boussole doit être muni d'un couvercle de laiton ou d'aluminium. Il est bon que la boussole soit munie d'un étui en cuir ou en toile. On fait également des boussoles en matière plastique.

La loupe de poche sert à l'examen des roches à grain fin, des fossiles et des minéraux; on en trouve qui sont serties de métal, de corne ou d'os; le grossissement doit être de cinq fois.

Le calepin avec un crayon pour noter les observations, de préférence en papier quadrillé, pour les croquis des affleurements.

Le sac servira à transporter les échantillons recueillis, les provisions et les réserves de papier et d'ouate. Un sac de montagne est commode et laisse les mains libres, mais il faut l'ôter de son dos chaque fois qu'il faut en retirer ou y mettre quelque objet. On peut également se servir des carnassières et des gibecières.

Le papier et la ouate sont indispensables pour l'emballage des fossiles et des échantillons de roches qui doivent être munis d'une étiquette portant un numéro d'ordre, pour ne pas les confondre lors du transport.

Pour les roches meubles et friables il faut se munir de quelques petits sacs faciles à confectionner avec du papier. Il serait préférable d'utiliser de petits sacs de toile, larges de 10 centimètres, longs de 15 ou 16 centimètres, avec des lacets en ficelle, au nombre de 20 à 30, numérotés dans l'ordre au crayon à copier. On y introduira les roches au fur et à mesure de leur collecte, en notant dans le calepin le numéro du sac contenant l'échantillon issu d'un affleurement donné. Cela nous évitera de numérotter chaque échantillon et de l'envelopper dans du papier lors de l'excursion. Toutes ces opérations seront effectuées dans le calme, lors du classement de la collection; les sacs pourront servir pour la prochaine excursion.

Il est très utile de tenir un journal, en y exposant en détail (à l'encre dans un cahier) les observations faites durant l'excursion et qu'on a notées en bref dans le calepin en croquant les affleurements. Une fois rentré, tous les détails seront reportés sur le papier et le dessin exécuté avec soin et colorié aux crayons de couleur.

Les dimensions des échantillons sont très variables, de 3×5 centimètres à 7×10 centimètres (en longueur et en largeur). L'épaisseur dépend de la qualité de la roche, mais ne doit pas dépasser la largeur. Le jeune chercheur de pistes peut se contenter de petits échantillons. Il faut absolument que l'échantillon ne soit pas altéré, autrement dit que les cassures soient fraîches. Il va de soi que les fossiles ne doivent pas être brisés.

Il faut en outre avoir un couteau de poche pour pouvoir tailler son crayon et éprouver la dureté des roches. Il n'est pas superflu d'avoir un petit mètre-ruban pour mesurer l'épaisseur des couches et des veines.

Il fait bon, si possible, faire l'acquisition d'une bonne carte topographique de la contrée. Elle sera très utile pour s'orienter, choisir l'itinéraire et y marquer les affleurements étudiés. Il faut coller la carte sur un morceau de toile ou de calicot après l'avoir coupée en rectangles de la dimension de la poche, car une carte en papier pliée plusieurs fois s'use rapidement aux coins quand on la porte dans sa poche. Il faut préserver soigneusement la carte de l'humidité et, si on l'a mouillée par mégarde, la sécher avec précaution et la redresser.

Un appareil photographique portatif sera très utile pour photographier le relief de la région et les affleurements, comme complément aux descriptions.

Nous indiquerons en conclusion la manière de définir à l'aide de la boussole le mode de gisement des couches de roches sédimentaires. Quand cette couche est inclinée, chaque strate a une orientation et un pendage déterminés dans un sens ou dans l'autre et sous un certain angle. La mesure de la ligne d'orientation, de la direction et de l'angle de pendage nous font voir les conditions de gisement. Il faut choisir une surface plane sur une des couches de l'affleurement et y appliquer la boussole dans le sens de sa longueur en la tenant horizontalement; en traçant au crayon une droite le long de la planchette de la boussole nous obtiendrons la ligne de direction des couches AB. Quand nous aurons libéré l'aiguille et qu'elle se sera arrêtée, nous noterons la direction qu'indique une de ses extrémités. Mettons qu'une des pointes indique NE (NO) 40° , et l'autre SO (SW) 220° . La ligne de direction est donc orientée, vers le NE, ou a un azimut égal à NE 40° ou SO 220° ; il est préférable de noter les azimuts nord, pour plus d'uniformité. En faisant faire à la tablette un angle de 90° avec la position précédente, autrement dit en l'appliquant par sa partie étroite

à la ligne de direction, nous la poserons de façon que l'extrémité nord de la tablette soit tournée dans le sens de la déclivité de la couche, autrement dit que la partie du limbe portant le signe N soit dirigée dans le sens de l'inclinaison de la couche. Nous noterons maintenant les indications de la pointe nord de l'aiguille, et non pas celles de la pointe sud. Admettons que le point indiqué par elle sera NO (NW) 310° ; la couche, orientée du Sud-Ouest au Nord-Est, pend vers le Nord-Ouest. L'azimut de pendage et celui de direction ont une différence de 90° , car la ligne de direction et celle de pendage sont perpendiculaires (fig. 285).

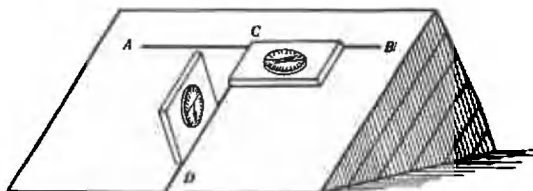


Fig. 285. Mesure de la direction et du pendage des couches.

Posons à présent la boussole sur le côté et appliquons-la verticalement le long de la ligne de pendage CD; le petit fil à plomb tournant autour de l'axe de l'aiguille nous donnera l'angle de pendage, par exemple 32° . Nous noterons les résultats des mesures effectuées de la façon suivante:

Direction NE (NO) 40° ; pendage NO (NW) $\angle 32^\circ$.

Nous n'écrivons pas l'azimut de pendage, car il diffère de l'azimut de direction de 90° . On peut s'en tenir à l'inscription du pendage seulement, mais il faudra alors noter son azimut, c'est-à-dire NO (NW) $310^\circ \angle 32^\circ$. Cela nous montre avec exactitude que la direction sera NE (NO) 40° .

Si le chercheur de traces ne dispose que d'une boussole de poche dans un étui rond, il ne pourra déterminer la direction et le pendage qu'approximativement, en comparant l'orientation dans laquelle la ligne de direction s'écarte de la direction nord-sud de la boussole à laquelle correspond l'aiguille aimantée, ainsi que la direction de pendage de la couche. L'angle de pendage sera lui aussi défini au jugé.

La direction et le pendage des veines et des plans de faille sont mesurés de la même façon, sur une face plane. Si cette dernière

fait défaut, les mesures sont effectuées en l'air au jugé et sont, naturellement, moins précises.

Nous terminons ce livre où nous avons tenté de montrer au lecteur l'intérêt et la valeur pratique de la science de la Terre, et de lui expliquer de quelle façon on peut procéder à certaines observations sur le vaste territoire de notre pays, en disposant de quelques instruments simples et de notions élémentaires. Les conditions naturelles de l'U.R.S.S. sont si variées, que le jeune chercheur trouvera autour de lui, dans n'importe quelle région, suffisamment d'objectifs pour lui permettre d'étudier la composition et la structure de la Terre et leurs rapports avec le relief contemporain. Il pourra découvrir et collectionner des fossiles, décrire des affleurements intéressants, déceler des indices de minéraux utiles et devenir un connaisseur de sa région natale. L'aider dans ce travail, l'initier aux éléments de la géologie, tel était le but que se proposait l'auteur de ce livre. Pour approfondir et élargir leurs connaissances en géologie, les jeunes amateurs pourront se reporter aux ouvrages, manuels et précis, énumérés dans la bibliographie sommaire qui suit.

•

BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE

I. OUVRAGES DE VULGARISATION SCIENTIFIQUE.

1. Barabanov V. Comment recueillir les minéraux et les roches. 1952.
2. Boubléinikov F. et Chtcherbakov D. A la recherche des minerais et des minéraux. 1939.
3. Varsanofiéva V. La vie des montagnes. 1950.
4. Varsanofiéva V. L'origine et la structure de la Terre. 1945.
5. Vlodavetz V. Les volcans de l'Union Soviétique. 1949.
6. Gorchkov G. Les tremblements de terre sur le territoire de l'Union Soviétique. 1949.
7. Zavaritskaïa E. Les volcans. 1948.
8. Mouzafarov V. Classification et nomenclature des minéraux et des roches. 1950.
9. Obroutchev V. Formation des montagnes et des gîtes minéraux. Plusieurs éditions de ces dernières années.
10. Obroutchev V. L'origine des montagnes et des continents. Plusieurs éditions de ces dernières années.
11. Savéliév L. Les traces sur la pierre. Histoire de la terre et de la vie. Rédigé par V. Obroutchev. 1940.
12. Sinégoub E. Comment collectionner les minéraux et les roches. 1951.
13. Stavrovski A. Classification et nomenclature des minéraux et des roches. 1949.
14. Stavrovski A. Les minéraux utiles. 1951.
15. Fersman A. La minéralogie récréative. 1954.
16. Fersman A. La géochimie récréative. 1952.
17. Iakovlev A. A la recherche des minéraux utiles. 1954.
18. Iakovlev A. Dans le règne de la pierre. 1951.
19. Apprends à connaître la région où tu vis. A l'usage de l'ethnographe régional. Rédigé par S. Obroutchev. 1951.
20. Le vade-mecum de l'ethnographe régional et du touriste. Sous la rédaction de S. Obroutchev, tome I, 1949; tome II, 1950.

II. TRAITES ET OUVRAGES SYSTEMATIQUES.

21. Bélooussov V. Questions essentielles de la géotectonique. 1954. (2^e édition de la *Géotectonique générale*. 1948.)
22. Bétékhtine A. Cours de minéralogie. 1951.
23. Bétékhtine A., Tatarinov P., et autres. Cours de gisements des minéraux utiles. 2^e édition. 1946.
24. Billings M. Géologie structurale. 1949.
25. Boldyrevski V. Petit atlas des fossiles caractéristiques. 1951.
26. Bouřalov N. Géologie structurale de campagne. 1953.
27. Dévitachvili L. Cours de paléontologie. 2^e édition. 1949.
28. Zavaritski A. Les roches éruptives. 1955.
29. Zoubkov. Précis de pétrographie. 1950.
30. Kalesnik S. Glaciologie générale. 1939.
31. Kritski V. et Tchétvérikov S. Précis de minéralogie et de pétrographie avec des éléments de cristallographie. 6^e édition. 1953.
32. Korovine M. Géologie historique. 1941.
33. Krichtofovitch A. Cours de paléobotanique. 1945.
34. Loutchitski V. Pétrographie. Tome I, 1947; tome II, 1949.
35. Lodotchnikov V. Précis de pétrologie sans microscope (pour les amateurs). 1934.
36. Obroutchev V. Les gîtes minéraux. 1935.
37. Obroutchev V. La géologie de campagne. 4^e édition. Tomes I et II, 1932.
38. Romer A. Paléontologie des vertébrés. 1939.
39. Roukhine L. Eléments de lithologie. 1953.
40. Savarenski F. Géologie des ingénieurs. 1937.
41. Smolianinov N. Traité pratique de minéralogie. 1948.
42. Smolianinov N. Comment reconnaître les minéraux d'après leurs indices externes. 1951.
43. Strakhov N. Eléments de géologie historique. Tomes I et II, 1949.
44. Titov A. Minéralogie avec des éléments de cristallographie. 1941.
45. Toropov N. et Boulak L. Cours de minéralogie et de pétrographie avec des éléments de géologie. 1953.
46. Oussov M. Géologie structurale. 1940.
47. Tsittel K. Eléments de paléontologie. 1^{re} partie. Les invertébrés. 1934.
48. Chvétsov M. Pétrographie des roches sédimentaires. 2^e édition, 1948.
49. Chtchoukine I. Morphologie générale des continents. Tome I, 1934; tome II, 1938.
50. Edelstein I. Précis de géomorphologie. 2^e édition, 1947.
51. Iakovlev N. Manuel de paléontologie. 1934.
52. Iakovlev S. Géologie générale. 9^e édition, 1949.
53. Iakovlev S. et autres. Aide-mémoire méthodique pour l'étude et le relevé géologique des sédiments quaternaires. 1^{re} et 2^e parties. Editions de l'Institut des recherches scientifiques de géologie. 1954-1955.

54. Dictionnaire géologique. Editions de l'Institut des recherches scientifiques de géologie. Sous la direction de A. Krichtofovitch et T. Spijarski. Tomes I et II, 1955.
55. Manuel méthodique de relevés géologiques et de prospections. Etabli par un groupe de géologues de l'Institut des recherches scientifiques de géologie, sous la direction générale de S. Mouzylev. 1954.
56. Le vade-mecum du géologue-pétrolier de campagne. Sous la direction de N. Vassoévitch. 2^e édition. Tomes I et II, 1954.

TABLE DES MATIERES

Avant-propos	3
I. Ce que murmure le ruisseau qui coule dans le ravin	7
II. Ce que l'on peut apprendre au bord de la mer	37
III. Le travail des eaux souterraines	59
IV. Les destructeurs de pierres	77
V. Le travail du vent à la surface de la Terre	102
VI. Les pierres voyageuses	132
VII. Les produits des entrailles de la Terre	170
VIII. Comment se forment et se détruisent les montagnes	212
IX. Pourquoi la terre tremble-t-elle tantôt ici tantôt là ?	251
X. Bref aperçu de l'histoire de notre Terre	268
XI. Les catastrophes dans l'histoire de la Terre	303
XII. Quelles sont les richesses que renferme la Terre	341
XIII. Au jeune chercheur de traces	365
Bibliographie sommaire	387